

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO STATCOM
NO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES
ELETROMECAÂNICAS EM SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Autor: Felipe Tomé de Sousa Diniz
Orientador: Dr. Flávio Henrique J. R. Silva

Brasília, DF
2018



Felipe Tomé de Sousa Diniz

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO STATCOM NO
AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES
ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Dr. Flávio Henrique J. R. Silva

Brasília, DF

2018

Felipe Tomé de Sousa Diniz

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO STATCOM NO AMORTECIMENTO
DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉ-
TRICA / Felipe Tomé de Sousa Diniz. – Brasília, DF, 2018-

76 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Flávio Henrique J. R. Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2018.

1. Palavra-chave01. 2. Palavra-chave02. I. Dr. Flávio Henrique J. R. Silva.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. ANÁLISE DO
DESEMPENHO DO STATCOM NO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES
ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

CDU 02:141:005.6

Felipe Tomé de Sousa Diniz

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO STATCOM NO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 12 de julho de 2018:

Dr. Flávio Henrique J. R. Silva
Orientador

Dr. Luís Filomeno de Jesus Fernandes
Convidado 1

Titulação e Nome do Professor
Convidado 02
Convidado 2

Brasília, DF
2018

Resumo

O aumento crescente de demanda por energia elétrica aliado ao fato do sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro ser interligado pelo Sistema Interligado Nacional, requer medidas de proteção e controle para garantir a disponibilidade e confiabilidade do sistema, consequentemente a sua estabilidade. Para aumentar essa margem de estabilidade, equipamentos como os FACTS são utilizados em sistemas elétricos de potência.

O presente trabalho contempla o uso de um controlador STACOM no sistema elétrico de potência a fim de aumentar a sua margem de estabilidade. Para tanto foram feitas modelagens matemáticas dos componentes do sistema máquina síncrona conectado a um barramento infinito através de uma linha de transmissão e também da estabilidade do sistema. O foco é a estabilidade transitória a fim de ter um melhor controle de estabilidade do sistema. Primeiramente, foram realizadas simulações no software MATLAB do circuito proposto, sem a inclusão do STATCOM e por fim foram feitas simulações deste sistema de potência com um STATCOM conectado a ele. O comportamento do circuito antes, durante e após a falta foi analisado e o tempo crítico de abertura da proteção do sistema foi estimado.

Palavras-chaves: sistemas elétricos de potência. estabilidade transitória. STATCOM. oscilações eletromecânicas.

Abstract

The increasing demand for electric energy coupled with the fact that the Brazilian electricity transmission system is interconnected by the National Interconnected System requires protection and control measures to guarantee the availability and reliability of the system, and consequently its stability. To increase this stability, equipment such as FACTS are used in electrical power systems.

This study contemplates the use of a STATCOM controller in a electric power system in order to increase it's stability margin. Therefore mathematical models of the single machine infinite bus and system stability were done. The focus is transient stability in order to get a better stability control of the system. Finally, simulations of the proposed circuit were done in MATLAB software, without STATCOM and finally simulations of this power system were made with a STATCOM connected to it. The behavior of the circuit before, during and after the fault was analyzed and also was found the critical opening time for the system.

Key-words: electric power system. transient stability. STATCOM. electromechanical oscillations.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação da estabilidade em sistemas elétricos de potência (SIQUEIRA, 2012)	16
Figura 2 – Gerador conectado a barramento infinito através de uma linha de transmissão.	22
Figura 3 – Diagrama esquemático de uma máquina síncrona trifásica (KUNDUR, 1993).	22
Figura 4 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona trifásica (ANDERSON; FOUAD, 2003).	23
Figura 5 – Sistema de referência síncrona (SIQUEIRA, 2012).	24
Figura 6 – Modelo pi de linha de transmissão (SIQUEIRA, 2012).	27
Figura 7 – Curvas de potência (KUNDUR, 1993).	35
Figura 8 – Diagrama unifilar do STATCOM conversor com fonte de tensão (HINGORANI, 2000).	38
Figura 9 – Diagrama unifilar do STATCOM conversor com fonte de corrente (HINGORANI, 2000).	38
Figura 10 – Sistema elétrico de potência com STATCOM conectado na linha de transmissão (SANTOS, 2003).	39
Figura 11 – Característica $P - \delta$ sem compensador e com compensador (SANTOS, 2003).	40
Figura 12 – a) Critério das áreas iguais sem compensação; b) Critério das áreas iguais com compensação (SANTOS, 2003).	41
Figura 13 – Ondas de tensão e corrente na saída do STATCOM (GYUGYI, 1994).	42
Figura 14 – Característica de tensão e corrente ($V - I$) do STATCOM (GYUGYI, 1994).	42
Figura 15 – Modelo Esquemático do STATCOM (SANTOS, 2003).	43
Figura 16 – Sistema elétrico de potência com compensação <i>shunt</i> por STATCOM (HINGORANI, 2000).	44
Figura 17 – Característica $P - \delta$ do sistema com compensação por STATCOM (HINGORANI, 2000).	44
Figura 18 – Aumento de margem de estabilidade com STATCOM (HINGORANI, 2000).	45
Figura 19 – Diagrama de blocos de controle do STATCOM (HINGORANI, 2000).	46
Figura 20 – Circuito básico equivalente do STATCOM (SHAHNIA, 2015).	48
Figura 21 – Diagrama unifilar de máquina síncrona conectada em um barramento infinito através de duas linhas de transmissão (BRETAS; ALBERTO, 2000).	52

Figura 22 – Diagrama para o sistema em falta (BRETAS; ALBERTO, 2000).	54
Figura 23 – Diagrama reduzido para o sistema em falta (BRETAS; ALBERTO, 2000).	55
Figura 24 – Diagrama para o sistema pós-falta (BRETAS; ALBERTO, 2000).	55
Figura 25 – Gráfico da variação do ângulo da máquina em relação ao tempo sem compensação para $t_a = 0,32$ segundos após a falta.	56
Figura 26 – Gráfico da variação da velocidade da máquina em relação ao tempo sem compensação para $t_a = 0,32$ segundos após a falta.	57
Figura 27 – Gráfico da variação do ângulo da máquina em relação ao tempo sem compensação para $t_{ca} = 0,486$ segundos após a falta.	57
Figura 28 – Gráfico da variação da velocidade da máquina em relação ao tempo para $t_{ca} = 0,486$ segundos após a falta.	58
Figura 29 – Diagrama unifilar do sistema.	58
Figura 30 – Diagrama trifilar do sistema sem STATCOM	60
Figura 31 – Diagrama de blocos dos componentes das turbinas	61
Figura 32 – Gráfico do ângulo da máquina 1 em relação à máquina 2 sem STATCOM	61
Figura 33 – Gráfico dos desvios de velocidade das máquinas 1 e 2 sem STATCOM	62
Figura 34 – Gráfico das tensões terminais das máquinas 1 e 2 sem STATCOM	62
Figura 35 – Gráfico das tensões nos barramentos do sistema sem STATCOM	62
Figura 36 – Gráfico da potência nas linhas de transmissão do sistema, sem STATCOM	63
Figura 37 – Diagrama trifilar do sistema com STATCOM	64
Figura 38 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, com STATCOM	64
Figura 39 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas 1 e 2, com STATCOM	65
Figura 40 – Gráfico das tensões terminais das máquinas 1 e 2, com STATCOM	65
Figura 41 – Gráfico das tensões nos barramentos do sistema, com STATCOM	66
Figura 42 – Gráfico da potência na linha de transmissão do sistema, com STATCOM	66
Figura 43 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, sem STATCOM	67
Figura 44 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas, sem STATCOM	67
Figura 45 – Gráfico das tensões terminais das máquinas, sem STATCOM	67
Figura 46 – Gráfico das tensões nos barramentos do sistema, sem STATCOM	68
Figura 47 – Gráfico da potência das linhas de transmissão do sistema, sem STATCOM	68
Figura 48 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, com STATCOM	69
Figura 49 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas 1 e 2, com STATCOM	69
Figura 50 – Gráfico da tensão terminal das máquinas 1 e 2, com STATCOM	69
Figura 51 – Gráfico da tensão nos barramentos do sistema, com STATCOM	69
Figura 52 – Gráfico da potência na linha de transmissão do sistema, com STATCOM	70
Figura 53 – Diagrama trifilar do sistema com STATCOM conectado no fim de linha	70

Figura 54 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, com STATCOM no fim de linha	71
Figura 55 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas 1 e 2, com STATCOM no fim de linha	71
Figura 56 – Gráfico das tensões terminais das máquinas 1 e 2, com STATCOM no fim de linha.	72
Figura 57 – Gráfico da tensão nos barramentos do sistema, com STATCOM no fim de linha.	72
Figura 58 – Gráfico da potência da linha de transmissão do sistema, com STATCOM no fim de linha	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de tempos críticos de abertura	73
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

SIN	Sistema Interligado Nacional
FACTS	Sistema de transmissão flexível em corrente alternada - (Flexible AC Transmission System)
STATCOM	Compensador síncrono estático - (Static Synchronous Compensator)
UMBI	Uma máquina síncrona acoplada a um barramento infinito
ONS	Operador Nacional do Sistema
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
p.u.	Por Unidade
LT	Linha de Transmissão
SVC	Compensador estático de reativos - (Static VAr Compensator)
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PSS	Estabilizador de sistema de potência - (Power System Stabilizer)

Lista de símbolos

(E'_d)	Tensão transitória no eixo de direto
(E'_q)	Tensão transitória no eixo de quadratura
E_{fd}	Tensão de campo
r	Resistência da máquina
x	Reatância do transformador
x_d	Reatância direta
x_q	Reatância de quadratura
x'_d	Reatância transitória de eixo direto
x'_q	Reatância transitória de quadratura
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
S	Potência aparente
I	Corrente elétrica
T_e	Torque elétrico
T_m	Torque mecânico
T_a	Torque de aceleração
$J\dot{\omega}_m$	Momento angular
M	Constante de inércia
δ	Ângulo da máquina síncrona
δ_g	Ângulo interno do gerador
δ_g^s	Ângulo de equilíbrio estável do gerador
δ_u^s	Ângulo de equilíbrio instável do gerador
ω	Desvio de velocidade

Z_{km}	Impedância série entre a barra k e barra m
Y_{km}	Admitância paralela entre a barra k e barra m
g_{km}	Condutância da linha entre a barra k e barra m
b_{km}	Susceptância da linha entre a barra k e barra m
V	Tensão do barramento
t	Tempo [s]
t_a	Tempo de abertura [s]
t_{ca}	Tempo crítico de abertura [s]
D	Constante de amortecimento da máquina
P_e^{prf}	Potência elétrica ativa no período pré-falta
P_e^f	Potência elétrica ativa no período de falta
P_e^{pf}	Potência elétrica ativa no período pós-falta
f	Frequência
rad	Radianos
A	Área
v	Velocidade
m	Massa

Sumário

I	INTRODUÇÃO	15
1	INTRODUÇÃO	16
	Introdução	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Contextualização do Problema	17
1.3	Objetivos do Trabalho	18
1.3.1	Objetivo Geral	18
1.3.2	Objetivo Específico	18
1.4	Composição e Estrutura do Trabalho	19
II	MODELAGEM	20
2	MODELAGEM DOS COMPONENTES DE UM SISTEMA ELÉ- TRICO DE POTÊNCIA	21
2.1	Máquina Síncrona	22
2.1.1	Comportamento elétrico da máquina	23
2.1.2	Comportamento Mecânico da Máquina	24
2.2	Linha de Transmissão	26
2.3	Cargas	28
3	ESTABILIDADE TRANSITÓRIA	31
3.1	Estabilidade	31
3.1.1	Estabilidade Dinâmica	31
3.1.2	Estabilidade Transitória	31
3.2	Determinação da Estabilidade	32
3.3	Critério das Áreas Iguais	33
4	COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO (STATCOM)	38
4.1	STATCOM	38
4.2	Estabilidade Transitória com STATCOM	39
4.2.1	Melhora na Estabilidade Transitória	40
4.3	Princípio de Funcionamento	41
4.4	Compensação de Potência Reativa	42
4.5	Efeito do STATCOM na Estabilidade Transitória	43
4.6	Margem de Estabilidade do Sistema com STATCOM	45

4.7	Controle do STATCOM	45
4.8	Modelagem Matemática do STATCOM	47
4.8.1	Modelagem Matemática Trifásica	47
4.8.2	Modelagem Matemática no Sistema de Coordenadas $d-q$ - Condições Balanceadas	49
4.8.3	Modelagem Matemática no Sistema de Coordenadas $d-q$ - Condições Não Balanceadas	49
III	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	51
5	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	52
5.1	Análise do Sistema Máquina Conectada a um Barramento Infinito	52
5.1.1	Análise Pré-falta	53
5.1.2	Análise durante a falta	54
5.1.3	Análise pós-falta	55
5.2	Simulação do sistema com tempo de abertura $t_a=0,32$ s após a falta	56
5.3	Simulação do sistema com tempo de abertura $t_a=0,486$ s após a falta	57
5.4	Sistema de duas máquinas síncronas	58
5.4.1	Falta trifásica no sistema sem o STATCOM	60
5.4.2	Falta trifásica no sistema com STATCOM	63
5.4.3	Falta Monofásica sem STATCOM	67
5.4.4	Falta monofásica com STATCOM	68
5.4.5	Falta trifásica com STATCOM conectado no fim da linha de transmissão	70
5.4.6	Análise dos tempos críticos de abertura	73
6	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	75

Parte I

Introdução

1 Introdução

1.1 Contextualização

Com o passar dos anos a demanda de energia elétrica no Brasil cresce, acompanhando o desenvolvimento do país e o aumento de sua população. A classe comercial é a que apresenta maior crescimento no período 2014-2024, de 5,2% ao ano, seguida da classe residencial (4,3% ao ano) e das outras classes (3,7% ao ano) e da classe industrial (2,9% ao ano cada). Ressalte-se, porém, que a autoprodução aumenta a um ritmo de 6,2% ao ano, fazendo com que o consumo industrial total de eletricidade cresça, em média, a 3,7% ao ano (EPE, 2015).

Para suprir a demanda energética existe o Sistema Interligado Nacional (SIN) que é o sistema de produção e transmissão de energia elétrica nacional, formado por vários sistemas interligados. O fornecimento de energia elétrica nesse sistema deve ter alta confiabilidade, pois a demanda de energia é contínua.

Um sistema de tamanha dimensão está sujeito a perturbações em vários pontos e por diversas razões, provocando oscilações que podem levá-lo a perder sua estabilidade. Por isso técnicas e equipamentos foram desenvolvidos ao longo do tempo a fim de auxiliar na manutenção da estabilidade do sistema quando ocorrem tais oscilações.

A estabilidade do sistema de potência pode ser definida como a propriedade de um sistema que o permite permanecer em um estado operacional de equilíbrio sob condições de operação normal e recupera um estado de equilíbrio aceitável após ser submetido a uma perturbação (KUNDUR, 1993).

Com o intuito da análise dos problemas de estabilidade, os engenheiros os classificaram de acordo com sua natureza física, variáveis de interesse e de acordo com intervalo de tempo a ser avaliado. A figura 1 ilustra a divisão.

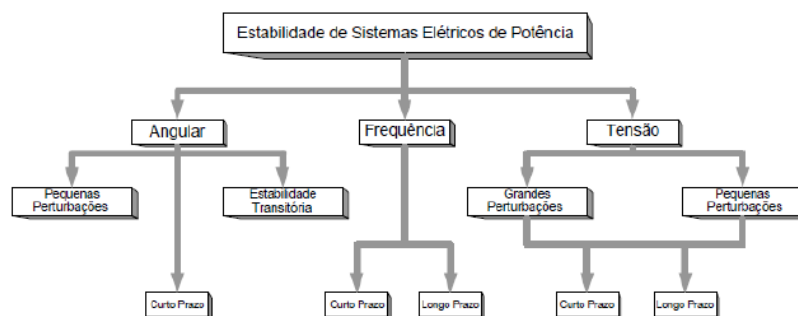


Figura 1 – Classificação da estabilidade em sistemas elétricos de potência (SIQUEIRA, 2012)

Sistemas de potência são não lineares, estão sujeitos a perturbações todo o tempo, sejam elas pequenas como as variações constantes de carga que ocorrem no sistema, ou grandes como a perda de uma unidade geradora, perda de linha de transmissão e curto circuito.

O foco do presente trabalho, é a estabilidade para grandes perturbações, chamada de estabilidade transitória, classificada como estabilidade angular. É definida como a capacidade de máquinas síncronas de um sistema de potência interconectado permanecerem em sincronismo após serem sujeitas à perturbação. Isto depende da capacidade de manter/restaurar equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque mecânico de cada máquina síncrona do sistema. A instabilidade que pode resultar ocorre na forma de aumento das oscilações angulares de alguns geradores que os levam à perda de sincronismo com os outros geradores (IEEE Task Force Report, 2004).

Uma alternativa para melhorar a estabilidade do sistema através do controle são os dispositivos FACTS, que podem operar no amortecimento das oscilações eletromecânicas, consequentemente aumentando a confiabilidade do sistema.

Um tipo de dispositivo FACTS que pode ser utilizado é o STATCOM, que é ligado em paralelo com a linha de transmissão através de um transformador e atua como compensador estático de reativos em um sistema de corrente alternada.

1.2 Contextualização do Problema

A análise da estabilidade transitória é de grande importância para garantir a segurança do sistema, no sentido de manter uma transmissão de energia elétrica constante e de qualidade. A perda dessa estabilidade, assim como a perda de estabilidade dinâmica, podem levar à apagões, podendo deixar muitas regiões sem energia elétrica, impactando não somente a população em geral mas também a indústria do país.

Todos os sistemas elétricos do mundo estão sujeitos a interrupções do suprimento em sua operação. A construção de um sistema totalmente imune a falhas exigiria redundâncias de equipamentos e circuitos, com investimentos tão elevados que a tarifa de energia necessária para remunerá-los seria inaceitável pela sociedade.

Por isso, no Brasil e em vários outros países, os sistemas elétricos são planejados pelo critério de confiabilidade $n-1$, segundo o qual eles devem ser capazes de suportar a perda de qualquer elemento sem interrupção do fornecimento. Isso significa que, mesmo que ocorra uma contingência simples, o sistema deve ser capaz de permanecer operando sem interrupção do fornecimento de energia, perda de estabilidade, violação de padrões de grandezas elétricas (frequência, tensão) e sem atingir limites de sobrecarga de equipamentos e instalações (ONS, 2017).

Fatores econômicos, como a exploração de novas fontes de geração eólicas e hidrelétricas em que o ponto de produção de energia se localiza muito distante dos centros de consumo, fazem com que os sistemas de transmissão de energia tenham que transmitir cada vez mais potência através de longas linhas de transmissão.

Estes fatores econômicos e de estabilidade levam à utilização de esquemas de compensação de potência reativa com o objetivo de aumentar a estabilidade e a capacidade de transmissão de potência, sem a necessidade de ampliação da rede de transmissão existente.

Em um sistema elétrico de potência ocorrem vários distúrbios seja pela variação da demanda de carga, grandes faltas ou perda de um gerador, fazendo com que o sistema não mantenha um ponto de equilíbrio por muito tempo.

Portanto grandezas como o ângulo do rotor das máquinas síncronas, a tensão nos barramentos do sistema e outras devem ser controladas a fim de manter a estabilidade. A instabilidade do sistema pode levar à interrupção dos serviços de transmissão e distribuição de energia elétrica.

A fim de realizar esse controle os dispositivos *FACTS* são muito utilizados, pois permitem controlar parâmetros de grande relevância para o funcionamento do sistema de potência como as oscilações de tensão e de potência, além de possibilitar o aumento da capacidade de transferir potência. Um compensador como o *STATCOM* conectado em paralelo à rede elétrica pode diminuir os harmônicos das correntes de carga e fornecer potência reativa agindo no controle da tensão e otimizando o fluxo de potência.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o amortecimento de oscilações eletromecânicas de um sistema elétrico de potência através de modelagem computacional dos seus componentes utilizando o software *MATLAB*. Será utilizado o *STATCOM* para realizar o controle e amortecimento dessas oscilações.

1.3.2 Objetivo Específico

Aumentar a margem de estabilidade do sistema elétrico de duas máquinas síncronas conectadas por duas linhas de transmissão proposto, com a inserção do *STATCOM* para aumentar o tempo de atuação da proteção do sistema.

1.4 Composição e Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é composto de cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste na introdução, em que se encontra a contextualização do problema e os objetivos do trabalho.

Nos capítulos 2 e 3, são apresentadas as modelagens matemáticas de todos os componentes do sistema elétrico e o conceito de estabilidade transitória, respectivamente. Nestes capítulos são apresentados as equações matemáticas algébricas e diferenciais que modelam o comportamento de cada componente.

O capítulo 4 trata de estudos preliminares da análise da estabilidade transitória, onde são feitas simulações no software MATLAB para um sistema elétrico de potência sem a inclusão do STATCOM. Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação para um sistema em falta sem controle.

No capítulo 5 encontra-se a conclusão do trabalho a partir dos resultados obtidos.

Parte II

Modelagem

2 Modelagem dos Componentes de um Sistema Elétrico de Potência

O objeto de estudo deste trabalho é a análise do amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas de potência, portanto é necessário modelar matematicamente os componentes desse sistema.

Um sistema de potência real tem como característica o fato de variar a carga consumida a todo instante, configurando um sistema não linear, ou seja é possível inferir que este sistema jamais está em estado estacionário em sua modelagem matemática. Portanto não existe nenhuma maneira de desenvolver uma função estabilizadora universalmente aplicável que seria ideal para uma ampla gama de parâmetros da máquina, do sistema e condições de operação. No entanto, mesmo que não seja ideal, seria altamente desejável ter uma função de transferência que proporcionasse amortecimento nos casos em que fosse muito necessário sem deterioração do amortecimento (DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

A fim de conseguir esta modelagem matemática do sistema, são necessárias simplificações para que os cálculos possam ser concretizados de forma mais simples e o entendimento seja facilitado. De forma básica, será usado um sistema de potência formado por uma máquina síncrona e uma linha de transmissão conectada a um barramento infinito. Outra simplificação adotada é assumir que a potência elétrica de saída dessa máquina é constante, portanto não pode haver oscilações.

Será adotado o modelo mais simples de analisar a estabilidade, o de máquina síncrona conectada a um barramento infinito através de uma linha de transmissão. Tal simplicidade se dá pelo fato de que as impedâncias da rede são reduzidas aos nós dos geradores do sistema.

O barramento infinito do sistema é considerado uma máquina que tem capacidade de gerar potência infinitamente e com uma grande inércia. Portanto a velocidade angular deste barramento não varia, independe da potência fornecida à rede. Por isso este barramento é uma referência angular para o sistema. Este modelo é utilizado para os casos em que o sistema de transmissão fornece muito mais potência às cargas do que a máquina síncrona a ser analisada, onde a tensão e frequência do sistema não se alteram independentemente do que ocorra com a máquina, e é composto por um gerador, linha de transmissão e um barramento infinito.

O modelo em questão é apresentado na figura 2, em que r e x são respectivamente a resistência e a impedância da linha de transmissão.

Assume-se então, que o barramento infinito com uma fonte que gera ou absorve

potência do sistema de forma ilimitada, com impedância nula e que conserva a sua velocidade angular sempre constante.

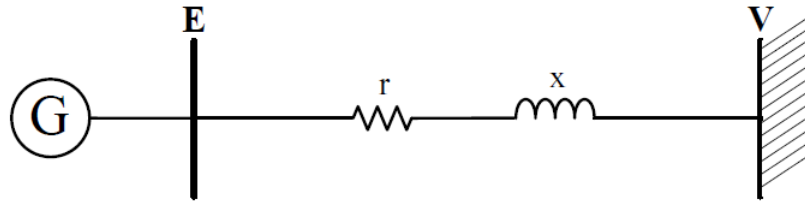


Figura 2 – Gerador conectado a barramento infinito através de uma linha de transmissão.

2.1 Máquina Síncrona

Geradores síncronos formam a principal fonte de energia elétrica em sistemas de potência. Todas as cargas do sistema elétrico são acionadas através de motores síncronos. Além disso compensadores síncronos são geralmente utilizados como fonte de fornecimento de potência reativa e controle de tensão. A principal adversidade relacionada à essas máquinas é a perda de sincronismo ([KUNDUR, 1993](#)).

A máquina síncrona é constituída, em sua forma física, de dois elementos essenciais: o campo e a armadura. O enrolamento de campo, localizado no rotor da máquina, é alimentado por corrente contínua e ao girar produz um campo magnético girante que por sua vez induz tensões nos enrolamentos de armadura, localizados no estator. No caso da máquina ser trifásica, existirá um conjunto de enrolamentos de campo e outro conjunto de enrolamentos de armadura, ambos com três fases cada ([KUNDUR, 1993](#)).

O esquemático de uma máquina síncrona trifásica é mostrado na figura 3.

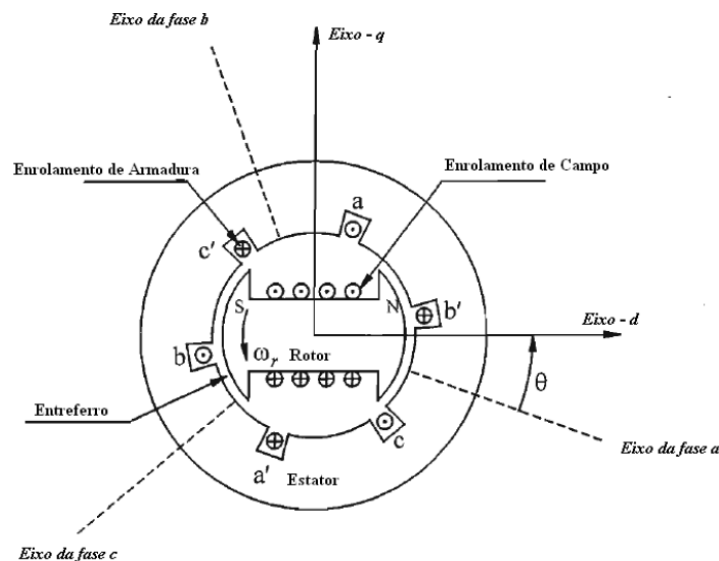


Figura 3 – Diagrama esquemático de uma máquina síncrona trifásica ([KUNDUR, 1993](#)).

2.1.1 Comportamento elétrico da máquina

Algumas simplificações devem ser levadas em consideração para que a modelagem matemática da máquina seja feita, são elas (KUNDUR, 1993):

- O enrolamento do estator é distribuído senoidalmente ao longo do entreferro mantendo um efeito mútuo com o respectivo rotor;
- As ranhuras do estator não causam variações consideráveis da indutância do rotor com a posição do rotor;
- A histerese magnética é desprezada;
- Os efeitos da saturação magnética são desprezados.

A partir dessas simplificações é possível chegar a modelos matemáticos mais simples para a máquina, tais como o modelo apresentado na figura 4.

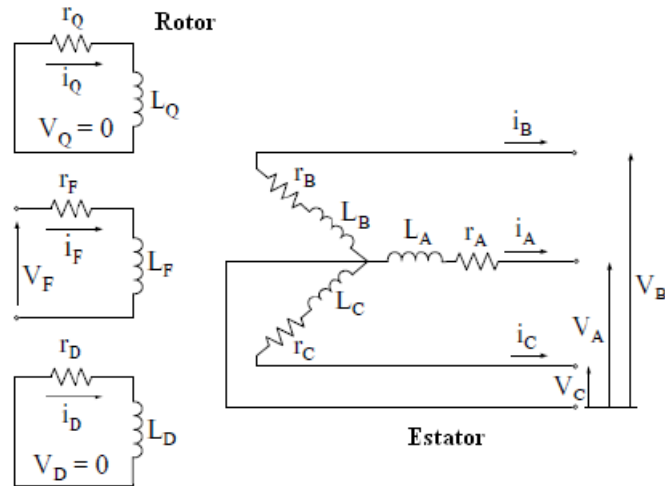


Figura 4 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona trifásica (ANDERSON; FOUAD, 2003).

Portanto a análise partindo das simplificações estabelecidas fornece equações satisfatórias que modelam o comportamento da máquina síncrona para o estudo em questão. As equações a seguir foram analisadas pelo sistema de dois eixos, direto e quadratura, da máquina. Este modelo leva em conta a tensão transitória no eixo direto (E'_d) e no eixo de quadratura (E'_q) e nos fornece equações algébricas e diferenciais que dizem respeito ao comportamento elétrico da máquina síncrona. A dedução das equações pode ser encontrada em (KUNDUR, 1993).

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{\tau_{do}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d)I_d] \quad (2.1)$$

$$\dot{E}'_d = \frac{-1}{\tau_{qo}} [E_d + (x_q - x'_q)I_q] \quad (2.2)$$

$$V_q = E'_q - rI_q + x'_d I_d \quad (2.3)$$

$$V_d = E'_d - rI_d + x'_q I_q \quad (2.4)$$

$$P_e = E'_q I_q + (x'_d - x_q^1) I_q I_d \quad (2.5)$$

Nas equações (2.1) a (2.5), (E'_d) e (E'_q) representam as tensões transitórias nos eixos d e q referentes às consequências do fluxo concatenado dos enrolamentos de campo; E_{fd} é a tensão de campo; I_q e V_q são respectivamente a corrente e tensão do eixo de quadratura; I_d e V_d são a corrente e tensão referentes ao eixo direto; x'_d e x'_q são respectivamente as reatâncias transitórias referentes ao eixo direto e ao eixo de quadratura; r é a resistência do estator por fase; τ_{qo} e τ_{do} são constantes de tempo dos eixos de quadratura e direto.

2.1.2 Comportamento Mecânico da Máquina

Em uma máquina, além de modelar o comportamento elétrico também é necessário entender o seu comportamento mecânico, que é intimamente ligado ao elétrico. A conversão da potência mecânica da máquina em potência elétrica depende diretamente do movimento de rotação do rotor no estator.

Esse movimento rotacional é caracterizado por um sistema de referências em relação ao rotor, estator e à referência síncrona como mostrado na figura 5.

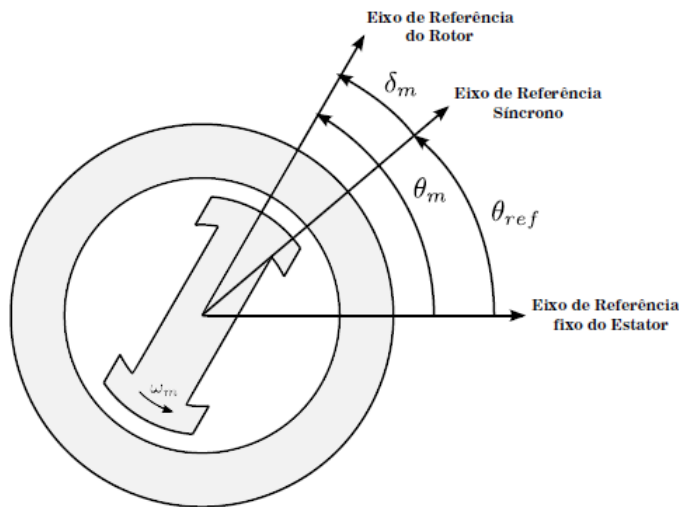


Figura 5 – Sistema de referência síncrona (SIQUEIRA, 2012).

Os eixos de referência do rotor e do motor forma entre si o ângulo Θ_m , e o eixo de referência do rotor forma com o eixo de referência síncrono o ângulo δ_m .

A velocidade angular em torno da armadura e a velocidade angular do rotor giram na mesma velocidade ω_m , caracterizando esse sistema como sendo inercial. Portanto as equações diferenciais de Θ_m e δ_m em relação ao tempo são iguais (STEVENSON, 1974).

A máquina apresenta um conjugado que consiste de um torque elétrico (T_e) e um torque mecânico (T_m), que utilizando a segunda lei de Newton para movimentos circulares modela a mecânica do sistema.

$$\sum T_{externo} = J\dot{\omega}_m \quad (2.6)$$

A equação (2.7) modela o movimento do rotor da máquina relacionando os torques mecânico e elétrico, e é conhecida como equação de *swing*.

$$J\dot{\omega}_m = T_m - T_e \quad (2.7)$$

Onde J significa o momento de inércia de todas as massas acopladas ao eixo. (T_a) é o torque de aceleração que age no eixo. Como a máquina é um gerador o torque de aceleração é mecânico e o de desaceleração é elétrico, portanto:

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.8)$$

A equação (2.8) estabelece que o torque mecânico (T_m) positivo acelera o eixo enquanto um torque elétrico (T_e) positivo o desacelera.

Na equação (2.7), a fim de ter uma avaliação mais profunda, adiciona-se uma parcela referente ao enrolamento de amortecimento, que é sempre no sentido oposto ao sentido de rotação da máquina.

$$J\dot{\omega}_m = T_m - T_e - T_{am} \quad (2.9)$$

Uma forma comum de analisar sistemas de potência é em função de sua potência (P), portanto multiplicando os dois lados da equação (2.9) por ω_m obtém-se uma equação em função das potências:

$$J\dot{\omega}_m\omega_m = P_m - P_e - T_{am}\omega_m \quad (2.10)$$

Em que,

$$P = \omega T \quad (2.11)$$

O termo $J\omega_m$ é chamado de momento de angular e denotado por M , que é a constante de inércia resultando em:

$$M = J\omega_m \quad (2.12)$$

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{M}(P_m - P_e - \omega_m T_{am}) \quad (2.13)$$

Quando se analisa a performance de uma máquina na rede elétrica é mais útil escrever a equação 2.13 em termos de um ângulo elétrico (δ_e), haja visto que na estabilidade transitória o interesse maior é a variação desse ângulo elétrico, que pode ser escolhido em relação à posição do rotor (ANDERSON; FOUAD, 1980).

Este ângulo é relacionado com o ângulo mecânico (δ_m) por:

$$\delta_e = p\delta_m \quad (2.14)$$

Na equação (2.14) p se refere número de par de pólos magnéticos δ_m é o ângulo mecânico e δ_e o ângulo elétrico. Por simplicidade o ângulo δ_e é escrito apenas como δ , que sempre será entendido como o ângulo elétrico definido anteriormente.

As equações (2.13) e (2.14) determinam o comportamento da máquina síncrona e são conhecidas como equação de *swing* ou equação de balanço. São elas:

$$\dot{\delta} = \omega \quad (2.15)$$

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{M}(P_m - P_e - \omega_m T_{am}) \quad (2.16)$$

2.2 Linha de Transmissão

As linhas de transmissão são sistemas utilizados para transmitir energia elétrica de uma fonte de geração de energia para a fonte de consumo, por meio de cabos condutores, que no caso de linhas aéreas, são fixos em torres de transmissão ou de distribuição de energia elétrica.

Estas linhas são utilizadas para transferir potência elétrica da fonte de geração ao consumidor final. Em muitos casos percorrem longas distâncias passando por áreas urbanas e rurais.

Os sistemas de linhas de transmissão podem ser modelados, por exemplo, como os modelos π e T . O modelo π concentra a admitância em paralelo da linha em duas partes

iguais, já o modelo T representa essa admitância concentrada no meio do circuito que representa a linha de transmissão.

Essas linhas tem quatro parâmetros característicos que são: resistência série, condutância em paralelo, indutância série e capacitância paralelo. A escolha do modelo a ser aplicado, geralmente, é feita de acordo com a extensão da linha de transmissão.

Linhas curtas (até 80 Km), em alguns estudos, tem sua capacitância desprezada, portanto a linha é representada por resistência e indutância. Linhas de média extensão (80 a 240 Km), geralmente é utilizado o modelo π . Linhas de longa extensão (acima de 240 Km) são modeladas pelo modelo de parâmetros distribuídos ou por mais de um modelo π (LEMONS, 2008).

Para a modelagem da linha de transmissão assume-se que a rede opera em regime permanente senoidal, isso é possível pois as dinâmicas eletromagnéticas do sistema são muito mais rápidas do que as eletromecânicas. Com isso é possível negligenciar as dinâmicas da rede (SIQUEIRA, 2012).

O modelo utilizado para os cálculos será o modelo π de linha de transmissão, pois é um dos modelos mais utilizados pelos calculos serem mais simplificados. Este modelo é representado por uma impedância série e duas admitâncias paralelas como mostrado na figura 2.2.

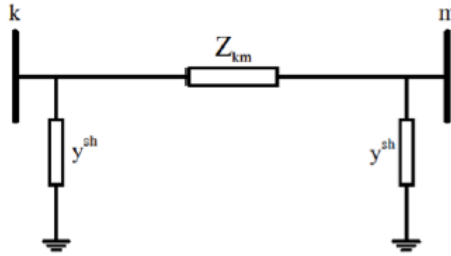


Figura 6 – Modelo pi de linha de transmissão (SIQUEIRA, 2012).

A impedância série é representada por Z_{km} e as admitâncias em paralelo por Y^{sh} . Z_{km} é composto pela resistência e pela reatância série da linha:

$$Z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2.17)$$

A admitância entre as barras Y_{km} é composta por uma condutância g_{km} e uma susceptância b_{km} e é dada por:

$$Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.18)$$

A condutância e a susceptância são calculadas, respectivamente, a partir das equações:

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.19)$$

$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.20)$$

Os modelos de linhas de transmissão podem ser feitos em parâmetro concentrados e parâmetros distribuídos. No caso de parâmetros concentrados assume-se que a capacitância, indutância e resistência do circuito se encontram delimitados no mesmo lugar, como um só componente eletrônico. Já nos parâmetros distribuídos a capacitância, indutância e resistência são considerados separadamente no circuito.

Este modelo de linha de transmissão possui a limitação de não serem lineares os comportamentos resistivo, capacitivo e indutivo em termos de parâmetros concentrados. Tal fato provoca um erro considerável se calculado para linhas longas (acima de 240 Km), o que leva a necessidade de modelagens mais complexas, que levem em conta a não linearidade observada e a utilização de mais de um modelo π da linha associados (LE MOS, 2008).

2.3 Cargas

Os sistemas elétricos de potência também são formados por cargas. Estas recebem a energia transportada pelas linhas de transmissão a fim de realizar trabalho. A fonte geradora fornece energia às cargas constantemente e esta dinâmica entre geração e consumo deve ser estável. Portanto as cargas são componentes que influenciam diretamente na estabilidade do sistema elétrico (KUNDUR, 1993).

A fim de modelar as cargas, são utilizadas simplificações, levando em conta que no comportamento real da carga a tensão e frequência do barramento tem realação direta com a carga. Para a modelagem simplificada são utilizados polinômios em que suas variáveis são a tensão e frequência do barramento. Para modelos complexos são utilizadas equações diferenciais e algébricas (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Exemplos de modelagens são a exponencial e a polinomial ZIP. Para essas modelagens são considerados a potência ativa (P_0), a potência reativa (Q_0), a tensão de referência (V_0), fatores de sensibilidade da potência ativa e reativa, respectivamente, (α_p) e (α_q). O modelo exponencial pode ser expresso pelas equações:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_p} \quad (2.21)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha_q} \quad (2.22)$$

Para estas condições existem três casos parciais:

- $\alpha_p = \alpha_q = 2$ Carga de impedância constante (Z);
- $\alpha_p = \alpha_q = 1$ Carga de corrente constante (I);
- $\alpha_p = \alpha_q = 0$ Carga de potência constante (P);

O modelo ZIP é formado por impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P). Este modelo por ser expresso pelas expressões:

$$P = P_0 \left(a_p + b_p \frac{V}{V_0} + c_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2.23)$$

$$Q = Q_0 \left(a_q + b_q \frac{V}{V_0} + c_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2.24)$$

Para as equações acima, a_p e a_q são respectivamente, a parcela da carga ativa e reativa modelada como potência constante, b_p e b_q são as parcelas modeladas em corrente constante e c_p e c_q as parcelas modeladas como impedância constante.

$$a_p + b_p + c_p = 1 \quad (2.25)$$

$$a_q + b_q + c_q = 1 \quad (2.26)$$

Para modelar uma carga ligada a um barramento k é feita a partir de equações que levam em conta as suas potências ativa (P_k) e reativa (Q_k). O modelo de carga abordado é de cargas dependentes da tensão.

O modelo em questão utiliza polinômios que equacionam as potências consumidas:

$$P_k(V_k) = \sum_0^j a_j V_j^k \quad (2.27)$$

$$Q_k(V_k) = \sum_0^j b_j V_j^k \quad (2.28)$$

Geralmente podemos utilizar a variação de j como sendo de 0 até 2. Os termos a_j e b_j dependem da carga. Quando $j = 0$ a parcela que depende da tensão é perdida (BRETAS; ALBERTO, 2000):

$$P_k(V_k) = a_0 \quad (2.29)$$

$$Q_k(V_k) = b_0 \quad (2.30)$$

Quando o $j = 1$, a equação resultante é linear, e os termos são proporcionais, como tensão proporcional à corrente:

$$P_k(V_k) = a_1 V_k \quad (2.31)$$

$$Q_k(V_k) = b_1 V_k \quad (2.32)$$

Ao chegar no último termo do intervalo de $j = 2$, o termo da potência se comporta como uma impedância constante e proporcional a um termo da tensão de segunda ordem (BRETAS; ALBERTO, 2000):

$$P_k(V_k) = a_2 V_k^2 \quad (2.33)$$

$$Q_k(V_k) = b_2 V_k^2 \quad (2.34)$$

Em modelos mais complexos as três parcelas das equações citadas são relacionadas originando um polinômio de grau dois que está em função da tensão.

As equações de potência ativa e reativa consumida pela carga são:

$$P_k(V_k) = a_0 + a_1 V_k + a_2 V_k^2 \quad (2.35)$$

$$Q_k(V_k) = b_0 + b_1 V_k + b_2 V_k^2 \quad (2.36)$$

3 Estabilidade Transitória

3.1 Estabilidade

Um sistema pode ser considerado estável quando, após ser perturbado, conseguir retornar ao estado inicial de estabilidade. Segundo (KUNDUR, 1993) um sistema elétrico é dito estável quando é capaz de suportar pequenas e/ou grandes perturbações sem interrupção no fornecimento de energia.

Portanto um sistema elétrico perde sua estabilidade transitória quando alguma perturbação afeta o ângulo de fase dos geradores do sistema, fazendo com que o seu sincronismo ao girar seja perdido.

É de grande importância o controle e proteção dos sistemas elétricos pois é comum que estes estejam sujeitos a diferentes perturbações todos os dias.

O propósito principal da análise de estabilidade de sistemas de potência é verificar o seu comportamento quando submetidos a algum tipo de perturbação. Com os resultados desta análise é possível ver se o sistema alcançará um novo ponto de operação em equilíbrio e em quanto tempo isso ocorre, ou se o sistema se manterá instável (BRETAS; ALBERTO, 2000).

3.1.1 Estabilidade Dinâmica

O termo estabilidade dinâmica é utilizado para caracterizar as pequenas perturbações no sistema.

Segundo (BOMFIM, 2000) um sistema elétrico de potência sofre constantemente perturbações de pequena ordem. Variações de carga e de velocidade de turbinas são dois dos exemplos mais comuns desse tipo de variações que têm por característica não ocasionar grandes problemas ao sistema como um todo, portanto não são geralmente suficientes para provocar a perda de sincronismo.

3.1.2 Estabilidade Transitória

O termo estabilidade transitória é bastante utilizado na literatura para caracterizar as grandes perturbações no sistema elétrico. São exemplos de grandes perturbações os curtos circuitos trifásicos e perdas de linha transmissão.

Um sistema é classificado como estável transitoriamente se, após ocorrência de um grande distúrbio, conseguir se manter em sincronismo alcançando um ponto de funciona-

mento estável (BRETAS; ALBERTO, 2000).

A análise de estabilidade transitória leva em conta o comportamento do sistema em curto intervalo de tempo, nos segundos seguintes à ocorrência da grande falta. Devido a esse fator é possível simplificar os modelos dos componentes de maneira válida.

3.2 Determinação da Estabilidade

Inicialmente considera-se que o sistema está em equilíbrio, ou seja, em condição pré falta, operando de forma permanente, nesse caso o ângulo mecânico δ será constante e sua determinação é feita através de um fluxo de carga (STEVENSON, 1974). Como δ é constante, suas derivadas serão nulas, consequentemente a velocidade e a aceleração angular do sistema serão nulas, ou seja, $\dot{\delta} = 0$ e $\ddot{\delta} = 0$.

No momento em que a falta ocorre ($t = 0$), a matriz de admitância e a topologia do sistema se alteram. Isso significa que o comportamento do sistema durante a falta será modelado por novas equações diferenciais. Este intervalo vai de $t = 0$ até o tempo de abertura (ta), que é quando a falta é eliminada.

De acordo com (BRETAS; ALBERTO, 2000), assim como a topologia do sistema muda durante a falta, esta também se altera após a eliminação da falta, formando novas equações diferenciais que modelam o comportamento do sistema pós-falta, que vai do tempo (ta) até o infinito.

Consequentemente o sistema terá três intervalos distintos, pré-falta, em falta e pós-falta. Cada intervalo possui uma equação diferencial distinta o que leva a equação a apresentar descontinuidades no tempo:

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e = 0 \begin{cases} t \leq 0, & P_e = P_e^{prf} \\ 0 < t \leq ta, & P_e = P_e^f \\ ta \geq, & P_e = P_e^{pf} \end{cases} \quad (3.1)$$

Na equação (3.1) M é a constante de inércia, D é a constante de amortecimento, P_m é a potência mecânica na entrada e P_e é a potência elétrica na saída da máquina.

A partir de (3.1) é possível escrever um conjunto de equações diferenciais para cada momento analisado (BRETAS; ALBERTO, 2000):

Sistema pré-falta

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e^{prf} = 0 \begin{cases} t \leq 0 \\ \delta(t) = \delta^0, \quad \dot{\delta}(0) = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Sistema em falta

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e^f \begin{cases} 0 < t \leq ta \\ \delta(t) = \delta^0, \quad \dot{\delta}(0) = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Sistema pós-falta

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} = P_m - P_e^{pf} \begin{cases} t \geq ta \\ \delta^{pf}(ta) = \delta^f(ta) \end{cases} \quad (3.4)$$

Ao analisar as fases do sistema conclui-se que na pré-falta o sistema é considerado em regime permanente, com valores constantes que podem ser encontrados pelo fluxo de carga. No momento em falta o tempo de abertura do sistema deve ser encontrado de forma que mantenha o sistema estável. Este tempo máximo encontrado será o tempo crítico da abertura das proteções do sistema, tempo programado em que o sistema de proteção deve agir para isolar o sistema. Após a falta as suas condições iniciais vão ser encontradas solucinando o sistema em falta com o tempo crítico (ta).

3.3 Critério das Áreas Iguais

Este critério é baseado no conceito de energia do sistema, principalmente do gerador síncrono que apresenta um equilíbrio entre a energia mecânica em sua entrada e a energia elétrica em sua saída. E seu equacionamento parte do princípio de forças conservativas e da conservação da energia (BRETAS; ALBERTO, 2000).

A partir da segunda lei de Newton é possível determinar equações do princípio da conservação de energia:

$$M \frac{dv}{dt} = F(x) \quad (3.5)$$

Multiplicando todos os termos da equação (3.5) pela velocidade temos:

$$M \frac{dv}{dt} v = F(x) v \quad (3.6)$$

$$M \frac{dv}{dt} v = F(x) \frac{dx}{dt} \quad (3.7)$$

Eliminando a variação em relação ao tempo chegamos à equação (3.8):

$$M v dv = F(x) dx \quad (3.8)$$

Integrando a equação (3.8) com os limites de integração sendo (x_1, v_1) e (x_2, v_2) obtém-se:

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \int_{x_1}^{x_2} F(y)dy \quad (3.9)$$

O termo de (3.9) a esquerda da igualdade é a variação de energia cinética (ΔE_c) e o termo a direita da igualdade é a variação da energia potencial (ΔE_p) multiplicada por um sinal negativo:

$$\Delta E_c = -\Delta E_p \quad (3.10)$$

A energia total do sistema (ΔE_T) é a soma da energia cinética com a potencial:

$$\Delta E_T = \Delta E_c + \Delta E_p \quad (3.11)$$

$$\Delta E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (3.12)$$

A partir da função energia e da equação de *swing* é possível chegar a uma equação para determinar a função energia do sistema máquina síncrona conectada em um barramento infinito:

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - \frac{E_g E_\infty}{x} \sin \delta \quad (3.13)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e^{max} \sin(\delta) \quad (3.14)$$

Em que P_e^{max} é a amplitude da potência elétrica transferida entre o gerador e o barramento infinito.

Ao multiplicar os dois lados da equação 3.14 pela velocidade angular (ω) e também eliminando a variação em relação ao tempo temos:

$$M \frac{d\omega}{dt} \omega = [P_m - P_e^{max} \sin(\delta)] \omega \quad (3.15)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} \omega = [P_m - P_e^{max} \sin(\delta)] \frac{d\delta}{dt} \quad (3.16)$$

$$\omega M d\omega = [P_m - P_e^{max} \sin(\delta)] d\delta \quad (3.17)$$

Escolhendo os limites inferiores de integração a velocidade angular $\omega = 0$ e o ângulo de equilíbrio estável ($\delta^{s-pré}$), antes da falta, e integrando a equação (3.17) tem-se:

$$\int_0^\omega \omega M d\omega = \int_{\delta^{s-pré}}^\delta [P_m - P_e^{max} \sin(\delta)] d\delta \quad (3.18)$$

$$\frac{M\omega^2}{2} = P_m(\delta - \delta^{s-pré}) + P_e^{max}(\cos \delta - \cos \delta^{s-pré}) \quad (3.19)$$

A partir das equações (3.9) e (3.10) são determinadas as funções energia para esse sistema:

$$E_c = \frac{M\omega^2}{2} \quad (3.20)$$

$$E_p = -P_m(\delta - \delta^{s-pré}) - P_e^{max}(\cos \delta - \cos \delta^{s-pré}) \quad (3.21)$$

Portanto nota-se que o cálculo da energia potencial do sistema corresponde ao cálculo da integral e está relacionado as áreas formadas pela intersecção das linhas das curvas de potência como mostrado na figura (3.3). A partir dessa curva de potência é possível determinar que o ângulo máximo que pode ser atingido após a eliminação da falta para que o sistema não perca estabilidade, é o ângulo que se refere ao ponto de equilíbrio instável ($\delta^{u-pós}$) (BRETAS; ALBERTO, 2000).

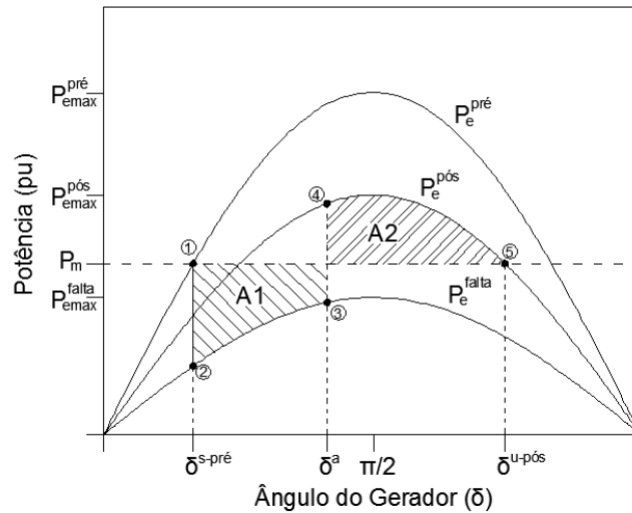


Figura 7 – Curvas de potência (KUNDUR, 1993).

Devido às mudanças de configuração do sistema nos estados em falta e pós-falta, sua energia total não é constante para todo o período de análise, porém, é constante analisando separadamente para cada estado. Considerando a curva de potência do sistema em falta, delimitada no intervalo entre os pontos 2 e 3 da figura (3.3). Para este intervalo,

a energia total é constante, logo, a energia total no ponto 2 ($E_T^{falta}(2)$) é igual a energia total no ponto 3 ($E_T^{falta}(3)$), pela equação (3.11):

$$E_T^{falta}(2) = E_T^{falta}(3) \quad (3.22)$$

$$E_c^{falta}(2) + E_p^{falta}(2) = E_c^{falta}(3) + E_p^{falta}(3) \quad (3.23)$$

Como no ponto 2 $\omega = 0$, a energia cinética neste ponto é igual a zero:

$$E_p^{falta}(2) = E_c^{falta}(3) + E_p^{falta}(3) \quad (3.24)$$

$$E_c^{falta}(3) = E_p^{falta}(2) - E_p^{falta}(3) \quad (3.25)$$

O mesmo é feito para os pontos 4 e 5, e como no equilíbrio instável ($\delta^{u-pós}$) a velocidade angular deve ser igual a zero, $E_c^{pos}(5) = 0$.

$$E_T^{pos}(4) = E_T^{pos}(5) \quad (3.26)$$

$$E_c^{pos}(4) + E_p^{pos}(5) = E_p^{pos}(5) \quad (3.27)$$

Em δ^a a falta é eliminada, transição entre os pontos 3 e 4, ocorre mudança nas curvas. No entanto essa mudança é instantânea, não provocando variação de velocidade nesse instante, ou seja, a energia cinética é constante entre esses pontos:

$$E_c^{pos}(4) = E_c^{falta}(3) \quad (3.28)$$

Substituindo (3.28) em (3.25):

$$E_c^{pos}(4) = E_p^{falta}(2) - E_p^{falta}(3) \quad (3.29)$$

$$E_p^{falta}(2) - E_p^{falta}(3) + E_p^{falta}(4) = E_p^{pos}(5) \quad (3.30)$$

$$E_p^{falta}(2) - E_p^{falta}(3) + E_p^{pos}(4) - E_p^{pos}(5) = 0 \quad (3.31)$$

Tomando (3.31) e olhando a relação da variação de energia potencial e a integral da curva (3.9), (3.10) e (3.19):

$$\int_{\delta^{s-pré}}^{\delta^a} [P_m - P_{emax}^{falta} \sin \delta] d\delta + \int_{\delta^a}^{\delta^{u-pos}} [P_m - P_{emax}^{pos} \sin \delta] d\delta = 0 \quad (3.32)$$

As integrais de (3.32) dizem respeito as áreas A_1 e A_2 da figura (3.3), e resulta em:

$$A_1 - A_2 = 0 \quad (3.33)$$

A condição de igualdade de áreas indica o limite de estabilidade, considerando que no ponto de equilíbrio instável o desvio de velocidade apresenta valor nulo. De modo geral, contudo, o sistema é estável se, para dado ângulo de abertura δ^a , a área de aceleração A_1 é menor ou igual à área de desaceleração A_2 (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Desta forma, o ângulo de abertura crítico, ou seja, o maior ângulo de eliminação da falta para o qual o sistema permaneça estável (condição onde $A_1 = A_2$ é obtido pela solução analítica da equação (3.32), sendo determinado pela relação da equação (3.34) (BRETAS; ALBERTO, 2000).

$$\cos \delta_{cr}^a = \frac{P_m(\delta^{s-pré} - \delta^{u-pos}) + P_{emax}^{falta} \cos \delta^{s-pré} - P_{emax}^{pos} \cos \delta^{u-pos}}{P_{emax}^{falta} - P_{emax}^{pos}} \quad (3.34)$$

A partir dessa equação, encontra-se o ângulo crítico de abertura em radianos. O tempo crítico de abertura será encontrado ao simular-se o sistema em falta até que se obtenha um ângulo igual ao ângulo crítico. No caso particular em que a potência acelerante ($P_m - P_e$) seja nula, pode-se encontrar o tempo crítico diretamente, já que a aceleração é constante nessa situação.

4 Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

4.1 STATCOM

O STATCOM opera como compensador estático de reativos que é conectado em *shunt* com a linha de transmissão, o qual a sua corrente de saída capacitiva ou indutiva pode ser controlada, independente da tensão alternada do sistema. O STATCOM regula a tensão no seu terminal por meio do controle da quantidade de potência reativa injetada ou absorvida do sistema de potência. Também pode ser projetado para funcionar com um filtro ativo de absorção de harmônicos do sistema (HINGORANI, 2000).

Sua conversão pode ser de duas fontes, tensão ou corrente. O conversor de fonte de tensão, representado na figura (8), é representado com tiristores em paralelo e um capacitor de corrente contínua como sua fonte, já o conversor de fonte de corrente, representado na figura (9), é representado por tiristores em série e uma indutância de corrente contínua como fonte de corrente.

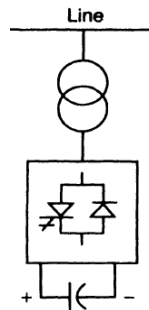


Figura 8 – Diagrama unifilar do STATCOM conversor com fonte de tensão (HINGORANI, 2000).

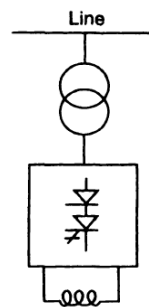


Figura 9 – Diagrama unifilar do STATCOM conversor com fonte de corrente (HINGORANI, 2000).

Compensadores *shunt*, como o STATCOM, tem compensação denominada compensação por seção, ou seja, o sistema de transmissão é seccionado em pontos intermediários por compensadores *shunt*, que conseguem manter a tensão do barramento no qual estão acoplados dentro de uma faixa aceitável. Adicionalmente, a capacidade de transferência de potência, em regime permanente, do sistema de transmissão pode ser aumentada pela inserção de um STATCOM no ponto médio (LARSEN et al., 1992).

4.2 Estabilidade Transitória com STATCOM

O circuito da figura 10, ilustra um sistema em que um STATCOM está conectado em um barramento no meio da linha de transmissão.

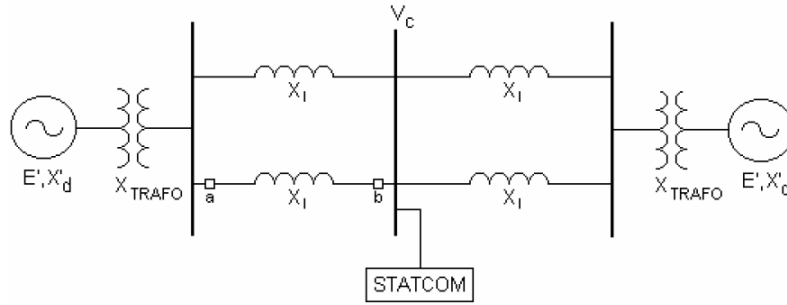


Figura 10 – Sistema elétrico de potência com STATCOM conectado na linha de transmissão (SANTOS, 2003).

A potência transferida é dada por:

$$P = \frac{2E'^2}{2X'_d + X_{trafo} + X_l} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (4.1)$$

Na equação 4.1, E' é a força eletromotriz dos geradores, X_l é a reatância série das linhas de transmissão, X_{trafo} é a reatância dos transformadores e δ é o deslocamento angular do rotor das máquinas síncronas (MILLER, 2003).

É possível analisar a característica da potência em relação ao ângulo do rotor da máquina pelo gráfico $P - \delta$ na figura 11.

As curva 1 representa as características do sistema elétrico sem a compensação do STATCOM, já a curva 2 representa as características com compensador ideal, conectado no meio das linhas de transmissão. Neste ponto o compensador mantém a tensão (V_c) constante.

Para atingir a forma da curva 2, a características de tensão e corrente, $V - I$, devem ser de um compensador ideal, ele deve responder de forma instantânea e deve ter uma capacidade de gerar corrente reativa alta o suficiente. No entanto, na prática não é possível alcançar nenhuma das condições citadas.

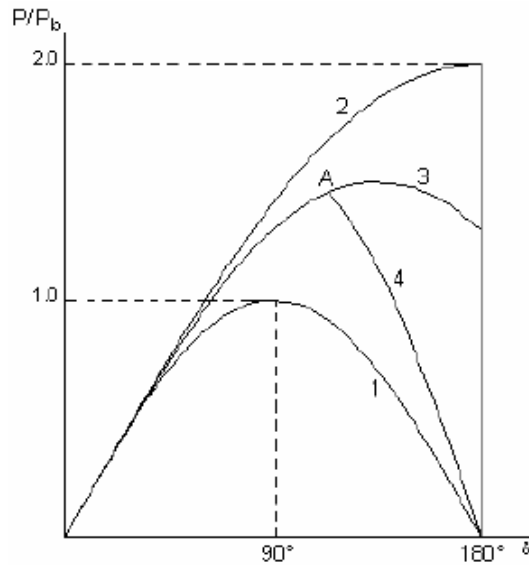


Figura 11 – Característica $P - \delta$ sem compensador e com compensador (SANTOS, 2003).

É da natureza do compensador ter um certo atraso em sua resposta, e uma pequena inclinação em sua característica $V - I$ entre (1% e 5%). O resultado desse comportamento muda a curva 2 do compensador ideal, para a curva 3. Outra limitação é a capacidade de geração de corrente reativa, que não consegue ser alto o suficiente, portanto a curva é interrompida no ponto A e segue a curva 4. O STATCOM tem capacidade de sustentar a corrente máxima de saída, ou seja, mantêm-se na curva 3 sem mudanças, o que resulta em uma maior capacidade de transmissão de potência e aumento na margem de estabilidade de sistemas elétricos (GYUGYI, 1994).

4.2.1 Melhora na Estabilidade Transitória

A melhora na estabilidade transitória pode ser representada pelo critério das áreas iguais, fazendo-se uma comparação entre as curvas do sistema sem compensação e com a compensação *shunt*, como a do STATCOM. A figura 12 representa a relação $P - \delta$ para o sistema sem e com compensação *shunt*.

Uma falta ocorre entre os disjuntores *a* e *b* na figura 10, e após a ocorrência a falta é eliminada pela abertura dos dois disjuntores. A curva 1 da figura 12 caracteriza a condição $P - \delta$ antes da falta e a curva (2) caracteriza o sistema durante a falta. Assume-se que a tensão é constante durante todo o processo.

A capacidade de transmissão de potência após a abertura dos disjuntores da linha de transmissão onde ocorreu a falta, é mostrada pela curva 3. As curvas 1 e 3 são diferentes, em geral, pela mudança na reatância equivalente do sistema.

Quando ocorre a falta, a tendência das máquinas conectadas no sistema é de acelerar, por conta da diferença gerada entre a potência elétrica e a mecânica. A velocidade

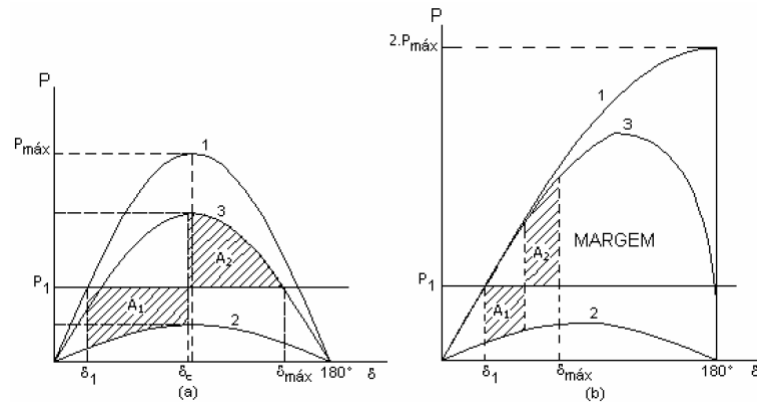


Figura 12 – a) Critério das áreas iguais sem compensação; b) Critério das áreas iguais com compensação (SANTOS, 2003).

continuará aumentando até a eliminação da falta que a causou.

Pelo critério das áreas iguais, o limite de estabilidade acontece quando a área de aceleração A_1 é igual a área de desaceleração A_2 . Na figura 12, em (a), no ponto P_1 o sistema está no limite de estabilidade para transmissão de potência antes da falta.

Na figura 12, em (b), mostra o efeito introduzido pela conexão do STATCOM no ponto médio da linha de transmissão. Com a mesma potência pré-falta P_1 e com a falta de mesma duração, em (b), é possível observar que a área de desaceleração do sistema com compensação é maior e parcialmente utilizada, ainda deixando uma margem de estabilidade alta.

Portanto, o limite de estabilidade transitória aumenta e a potência que pode ser transferida pode alcançar um nível alto, em que o sistema sem compensação não consegue alcançar (MILLER, 2003).

4.3 Princípio de Funcionamento

O STATCOM opera como uma fonte de potência reativa, conectada em *shunt* ao sistema elétrico de potência por meio de um transformador. O princípio de funcionamento pode ser comparado de forma análoga ao compensador síncrono, comparando a tensão do capacitor de corrente contínua com o efeito da tensão de campo. Portanto, é possível dizer que se a tensão do capacitor de corrente contínua aumentar em relação ao seu valor nominal, o STATCOM estará sobrecarregado e gerando potência reativa. Caso contrário, se a tensão do capacitor de corrente contínua diminuir em relação ao seu valor nominal, o STATCOM estará subexcitado e absorvendo potência reativa do sistema.

A figura 13 representa graficamente as formas de onda da tensão e corrente na saída do STATCOM.

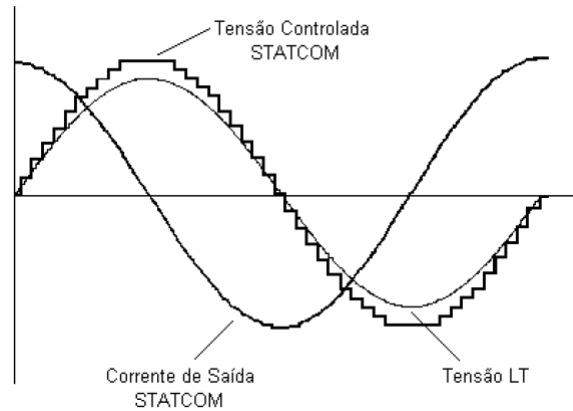


Figura 13 – Ondas de tensão e corrente na saída do STATCOM (GYUGYI, 1994).

O STATCOM pode ser visto como uma fonte de tensão alternada, conectada em série a uma reatância de acoplamento e a sua característica de tensão e corrente de saída $V - I$. A tensão fornecida pelo STATCOM é superior ao SVC devido a sua capacidade de fornecer a corrente capacitiva total, mesmo com a tensão do sistema se aproximando de zero. Adicionalmente, o STATCOM apresenta um ganho transitório tanto na região indutiva quanto na região capacitiva.

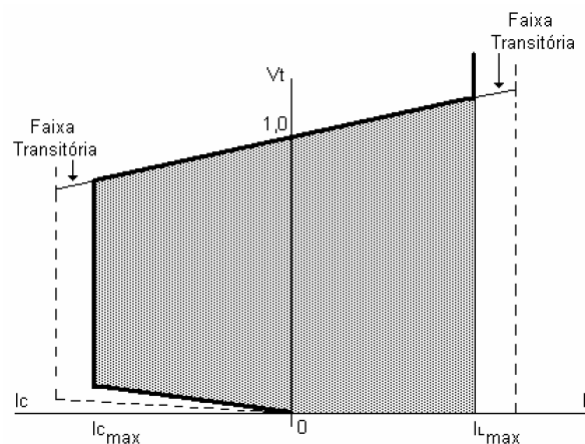


Figura 14 – Característica de tensão e corrente ($V - I$) do STATCOM (GYUGYI, 1994).

4.4 Compensação de Potência Reativa

O esquema com os componentes de um STATCOM é mostrado na figura 15, onde consta um inversor multi pulso, um capacitor de corrente contínua, um transformador de acoplamento e um controle do equipamento.

Com esta operação, o inversor consegue manter o capacitor em nível de tensão adequado para efetuar o controle de potência reativa, no ponto de conexão do STATCOM. Com isso a tensão de saída do inversor fica com ângulo um pouco adiantado em

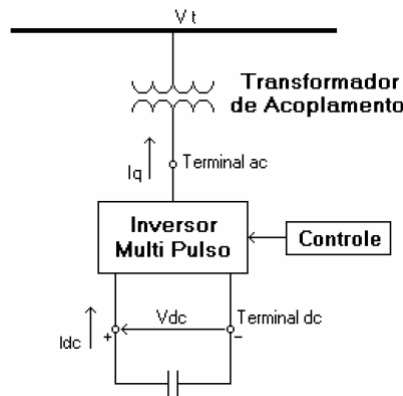


Figura 15 – Modelo Esquemático do STATCOM (SANTOS, 2003).

relação à tensão do sistema de potência. Isto faz com que o inversor absorva um pouco de energia ativa, necessária para repor as perdas dos elementos semicondutores e para manter a tensão do capacitor de corrente contínua em um nível adequado de operação. Este mecanismo de controle é usado para aumentar ou diminuir a tensão do capacitor, conseqüentemente é possível controlar a amplitude da tensão de saída do inversor para fazer a troca de potência reativa com o sistema de potência.

O comportamento da potência reativa entre o sistema elétrico de potência, em regime permanente, e o STATCOM pode ser dado de dois modos, o equipamento pode fornecer energia reativa ao sistema ou pode absorver energia reativa do sistema como é possível inferir do gráfico da figura 14.

Também é possível controlar a corrente de saída em toda a faixa controlável, independente da tensão do sistema de potência em que estiver conectado. Com isso, o STATCOM é capaz de fornecer a corrente capacitiva total em qualquer nível de tensão, inclusive próximo a zero.

Estas características faz o STATCOM ser considerado superior no suporte de tensão em relação a outros dispositivos FACTS, que não são capazes de fornecer a corrente capacitiva total quando a tensão do sistema de potência diminui. Adicionalmente, o STATCOM realiza uma compensação dinâmica melhor do que um SVC de mesmo valor, apresenta um ganho transitório tanto na região capacitiva quanto na indutiva (HINGORANI, 2000).

4.5 Efeito do STATCOM na Estabilidade Transitória

A melhoria na estabilidade transitória em um sistema de potência com STATCOM conectado, será verificada em relação ao circuito mostrado na figura 16.

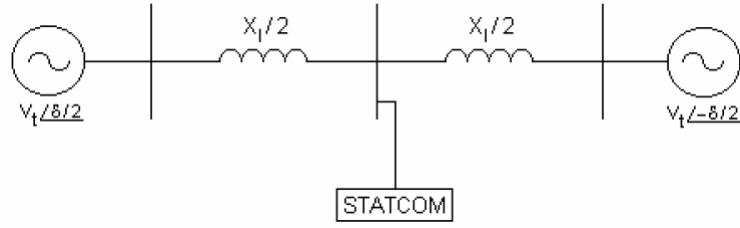


Figura 16 – Sistema elétrico de potência com compensação *shunt* por STATCOM (HINGORANI, 2000).

Como visto anteriormente, a melhoria na estabilidade transitória pode ser vista no gráfico $P - \delta$ do sistema de potência, e a figura 17 representa a potência transmitida P em relação ao deslocamento angular δ de um sistema de potência com compensação por STATCOM no meio da linha de transmissão.

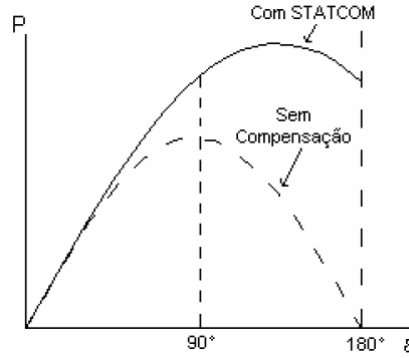


Figura 17 – Característica $P - \delta$ do sistema com compensação por STATCOM (HINGORANI, 2000).

A potência do sistema da figura 16 é dada por:

$$P = \left(\frac{2V_t^2}{X_l} \right) \text{sen} \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (4.2)$$

Como visto, o STATCOM consegue fornecer a corrente máxima capacitiva de saída ($I_{cm\acute{a}x}$), independente do deslocamento angular (δ) e da variação de tensão no ponto de conexão do STATCOM.

A potência transmitida pelo sistema compensado segundo (HINGORANI, 2000) é:

$$P = \left(\frac{2V_t^2}{X_l} \right) \text{sen} \left(\frac{\delta}{2} \right) + \frac{V_t I_{cm\acute{a}x}}{2} \text{sen} \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (4.3)$$

4.6 Margem de Estabilidade do Sistema com STATCOM

Assumindo que o sistema opera inicialmente em regime permanente em condições de P_0 e δ_0 antes de ocorrer a falta.

Uma falta trifásica é aplicada no sistema e devido a isso, a potência elétrica transmitida neste sistema, durante o evento, é zero. Durante a falta, a máquina síncrona tem a tendência de acelerar, pois surge uma diferença entre a potência mecânica e a potência elétrica dessa máquina, pois, considera-se a potência mecânica da máquina constante.

O gráfico da figura 18 ilustra o comportamento da máquina, onde a área de aceleração é demonstrada pela área rachurada (A_1), e o deslocamento angular do rotor da máquina durante a falta, muda de δ_0 para δ_1 , em que $\delta_1 > \delta_0$.

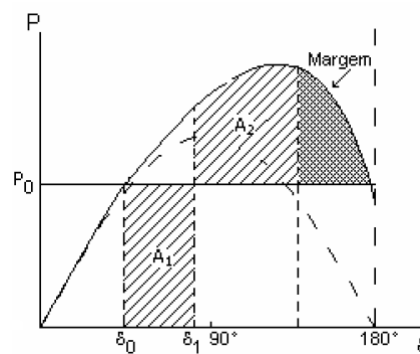


Figura 18 – Aumento de margem de estabilidade com STATCOM (HINGORANI, 2000).

Após a eliminação do sistema, o sistema é reestabelecido e a potência transmitida é maior do que a potência mecânica, em razão do incremento do deslocamento angular de δ . Em razão disto, o sistema tem a tendência de desacelerar, demonstrado na área rachurada A_2 (HINGORANI, 2000).

A área definida como Margem, área sombreada, ilustra a margem de estabilidade transitória do sistema. Portanto, é possível perceber que a potência elétrica transmitida pode ser aumentada, devido a esse aumento na margem de estabilidade do sistema.

4.7 Controle do STATCOM

O controle do STATCOM será representado a partir de um esquema básico. O diagrama de blocos do sistema deste sistema de controle, junto ao circuito equivalente de Thévenin do sistema de potência, está ilustrado na figura 19.

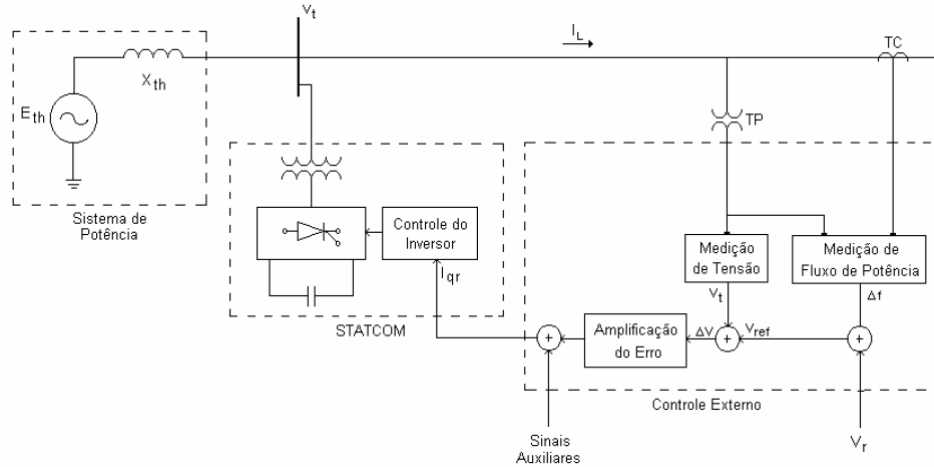


Figura 19 – Diagrama de blocos de controle do STATCOM (HINGORANI, 2000).

O controle deste sistema básico do STATCOM se dá da seguinte maneira, o controle interno do inversor, que gera o sinal de disparo dos tiristores, recebe o sinal de referência I_{qr} , que é configurado para a corrente reativa de saída desejada, a qual representa a demanda de potência reativa do sistema de potência. A partir deste sinal de referência, o controle interno do inversor processa e seleciona a tensão necessária de saída do STATCOM em relação à tensão do sistema, de modo a compensar dinamicamente o sistema no qual o equipamento está acoplado.

O STATCOM tem condições efetivas de minimizar a magnitude e a duração de distúrbios em um sistema elétrico de potência, pela regulação da tensão terminal e amortecimento de oscilações eletromecânicas. Com essa finalidade, um controle externo deve ser empregado para gerar o sinal de referência para o controle interno do STATCOM, e produzir a potência reativa necessária para minimizar o distúrbio do sistema elétrico (CHUN et al., 1998).

A malha externa de controle básico é construída para regular a tensão terminal através do controle da corrente reativa de saída do STATCOM. Com esta finalidade, como mostrado na figura (19), a amplitude V_t da tensão terminal é medida através de um transformador de potencial e de um circuito processador. A amplitude da tensão medida é comparada com a tensão de referência V_{ref} . A diferença entre essas duas grandezas, o sinal de erro ΔV , é amplificada e processada através de um processador de erro, para fornecer o sinal de referência I_{qr} correspondente à corrente reativa desejada de saída.

O amortecimento das oscilações no sistema de potência pode ser realizado pela modulação (controle) da corrente reativa de saída do STATCOM (YU, 2000).

Com base na figura (19), o amortecimento de oscilações no sistema, através da modulação da potência reativa, pode ser realizado modificando a tensão de referência V_{ref} . Isto é, um sinal representando a oscilação de potência do sistema é obtido ou pela

medição direta da frequência (variação Δf) ou pela medição da potência ativa transmitida (variação $\int P dt$) e somado a V_r , já que tanto Δf como $\int P dt$ são proporcionais ao deslocamento angular do rotor da máquina síncrona.

O sinal resultante desta soma induz a corrente reativa de saída do STATCOM à oscilar ao redor do ponto de operação definido pela tensão de referência V_r . Isto obriga a tensão terminal a aumentar quando, por exemplo, o desvio de frequência (Δf) for positivo, de modo a aumentar a potência elétrica transmitida e assim opor-se à aceleração das máquinas síncronas do sistema.

De maneira análoga, este sinal faz com que a tensão terminal diminua quando Δf for negativo, de modo a reduzir a potência elétrica transmitida pelo sistema e com isso opor-se à desaceleração das máquinas síncronas do sistema. Portanto a malha de controle externa do STATCOM possibilita uma maneira eficaz de reduzir as oscilações no sistema, na ocorrência de distúrbios, além de aumentar sua estabilidade transitória (YU, 2000).

4.8 Modelagem Matemática do STATCOM

O STATCOM pode ser modelado como uma fonte de tensão alternada onde a magnitude, o ângulo de fase e a frequência da tensão de saída são controláveis. Será usado para a modelagem, o sistema por unidade (pu), onde i_b e v_b são os valores de base e ω_b é a velocidade angular na frequência nominal do sistema (SHAHNIA, 2015):

$$\begin{aligned} i'_{pa} &= \frac{i_{pa}}{i_B} & i'_{pb} &= \frac{i_{pb}}{i_B} & i'_{pc} &= \frac{i_{pc}}{i_B} \\ v'_{pa} &= \frac{v_{pa}}{v_B} & v'_{pb} &= \frac{v_{pb}}{v_B} & v'_{pc} &= \frac{v_{pc}}{v_B} \\ v'_{ia} &= \frac{v_{ia}}{v_B} & v'_{ib} &= \frac{v_{ib}}{v_B} & v'_{ic} &= \frac{v_{ic}}{v_B} \\ z'_B &= \frac{z_B}{i_B} & L'_p &= \frac{\omega_B L_p}{z_B} & R'_p &= \frac{R_p}{z_B} \\ v'_{dc} &= \frac{v_{dc}}{v_B} & i'_{dc} &= \frac{i_{dc}}{i_B} & C' &= \frac{1}{\omega_B C_{zB}} & R'_c &= \frac{R_c}{z_b} \end{aligned} \quad (4.4)$$

4.8.1 Modelagem Matemática Trifásica

O circuito equivalente do STATCOM está ilustrado na figura 20. Este equipamento é modelado como uma fonte de tensão (tensões v'_{pa} , v'_{pb} , v'_{pc}), que é conectado à rede através da indutância $\frac{L'_p}{\omega_B}$ e da resistência R'_p , que representam as perdas do circuito de acoplamento. L_p representa o valor da reatância por unidade, portanto, a indutância é calculada por $\frac{L'_p}{\omega_B}$. A corrente do STATCOM é representada por i'_p . O circuito de corrente contínua é modelado como uma fonte de corrente (v'_{dc}), conectada ao capacitor C' e à resistência R'_c . A resistência R'_c é utilizada para representar as perdas do semicondutor e do circuito de corrente contínua.

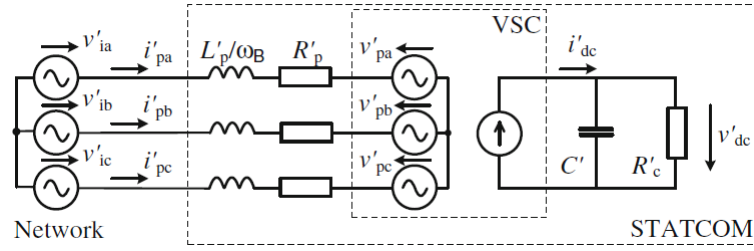


Figura 20 – Circuito básico equivalente do STATCOM (SHAHNIA, 2015).

Baseado no circuito equivalente trifásico da figura 20, podem ser escritas equações diferenciais para as correntes do STATCOM. A diferença das tensões do sistema elétrico de potência (v'_{ia} , v'_{ib} , v'_{ic}) e as tensões do STATCOM (v'_{pa} , v'_{pb} , v'_{pc}), resultam nas correntes do STATCOM (i'_{pa} , i'_{pb} , i'_{pc}) através do circuito de acoplamento (SHAHNIA, 2015):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_{pa} \\ i'_{pb} \\ i'_{pc} \end{bmatrix} = \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} \begin{bmatrix} i'_{pa} \\ i'_{pb} \\ i'_{pc} \end{bmatrix} + \frac{\omega_B}{L'_p} \begin{bmatrix} v'_{ia} - v'_{pa} \\ v'_{ib} - v'_{pb} \\ v'_{ic} - v'_{pc} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para uma modelagem mais precisa do STATCOM, o circuito do lado de corrente contínua também deve ser descrito, mesmo não sendo absolutamente constante. O lado de corrente contínua pode ser expresso como (SHAHNIA, 2015):

$$i'_{dc} = \frac{1}{\omega_B C'} \frac{dv'_{dc}}{dt} + \frac{v'_{dc}}{R'_c} \quad (4.6)$$

Para descrever a conexão entre o lado CA e o lado CC, considera-se a potência instantânea do VSC. A potência instantânea no lado CC é sempre igual à potência no lado CA:

$$v'_{dc} i'_{dc} = v'_{pa} i'_{pa} + v'_{pb} i'_{pb} + v'_{pc} i'_{pc} \quad (4.7)$$

A conexão entre as tensões do VSC, do lado CA e o lado CC podem ser descritos pela função de comutação (sinais S_a , S_b , S_c), descrevendo a geração de tensão CA a partir da tensão CC:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v'_{pa} \\ v'_{pb} \\ v'_{pc} \end{bmatrix} = k_p \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} v'_{dc} \quad (4.8)$$

em que k_p depende do tipo de conversor. Este fator poderia ser omitido, no entanto, ele permite considerar diferentes topologias de conversores que contenham diferentes amplitudes de tensão nominal do lado CC para o lado CA.

A partir das equações 4.7 e 4.8, é possível chegar na expressão para a corrente do lado CC:

$$i'_{dc} = k_p S_a i'_{pa} + k_p S_b i'_{pb} + k_p S_c i'_{pc} \quad (4.9)$$

A corrente CC 4.9 é incluída na equação 4.6, levando a uma descrição completa do lado CC do circuito. O conjunto completo de equações que descreve a operação do STATCOM, incluindo o lado CC do circuito é dado por (SHAHNIA, 2015):

$$\begin{bmatrix} i'_{pa} \\ i'_{pb} \\ i'_{pc} \\ i'_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & 0 & 0 & \frac{-k_p \omega_B}{L'_p} S_a \\ 0 & \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & 0 & \frac{-k_p \omega_B}{L'_p} S_b \\ 0 & 0 & \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & \frac{-k_p \omega_B}{L'_p} S_c \\ k_p \omega_B C' S_a & k_p \omega_B C' S_b & k_p \omega_B C' S_c & \frac{-\omega_B C'}{R'_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{pa} \\ i'_{pb} \\ i'_{pc} \\ i'_{dc} \end{bmatrix} + \frac{\omega_B}{L'_p} \begin{bmatrix} v'_{ia} \\ v'_{ib} \\ v'_{ic} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

4.8.2 Modelagem Matemática no Sistema de Coordenadas $d-q$ - Condições Balanceadas

A modelagem matemática completa no sistema de coordenadas $d-q$ é dado na equação xx. A constante ω é a velocidade angular da frequência fundamental da componente da tensão. Devido a dependência que a transformação $d-q$ tem da frequência, o modelo matemático derivado só é válido para a componente da frequência fundamental. Para a avaliação de qualquer outro harmônico ou da componente da sequência negativa.

$$\begin{bmatrix} i'_{pd} \\ i'_{pq} \\ v'_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & \omega & \frac{-k_p \omega_B}{L'_p} S_d \\ -\omega & \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & \frac{-k_p \omega_B}{L'_p} S_{dq} \\ \frac{3k_p \omega_B C^c}{2} S_d & \frac{3k_p \omega_B C^c}{2} S_q & \frac{-\omega_B C'}{R'_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{pd} \\ i'_{pq} \\ v'_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_B}{L'_p} v'_{id} \\ \frac{\omega_B}{L'_p} v'_{iq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

4.8.3 Modelagem Matemática no Sistema de Coordenadas $d-q$ - Condições Não Balanceadas

Como já mencionado, a transformação $d-q$ é dependente da frequência, portanto a equação 4.11 só é válida para as componentes de sequência positiva da frequência fundamental. Para descrever o STATCOM em condições desbalanceadas é necessário que outro conjunto de equações seja adicionado à modelagem, que descreve a operação do equipamento para a sequência negativa da frequência fundamental (BLAZIC; PAPIC, 2006).

O modelo matemático desenvolvido para esta condição é composta de duas partes. A primeira parte descreve a operação do equipamento com componentes de sequência

positiva, a segunda parte descreve a operação em sequência negativa e as duas juntas representam um circuito de corrente contínua em comum.

A transformação na referência rotativa $d-q$ é uma transformação da frequência que modifica a frequência dos sinais transformados. As componentes positivas da frequência fundamental são transformadas em valores de corrente contínua (em regime permanente), enquanto as componentes negativas da frequência fundamental são transformadas em componentes harmônicas com frequência igual ao dobro da frequência fundamental. A componente CC, que representa a sequência positiva, pode ser extraída do sinal da transformada com o uso de filtro passa-baixa. Para o cálculo das componentes de sequência negativa é utilizado uma matriz de transformação T_{dq} . (SHAHNIA, 2015).

$$T_{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Ao utilizar T_{dq} as componentes de sequência negativa da frequência são transformadas em grandezas CC, enquanto as componentes de sequência positiva são transformadas em componentes harmônicas com frequência igual ao dobro do valor da frequência fundamental. A componente CC, que representa a sequência negativa do sinal da frequência fundamental, pode ser extraída do sinal da transformado com o uso de filtro passa-baixa.

O modelo matemático completo para condições não balanceadas é:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_{pdp} \\ i'_{pqp} \\ i'_{pdn} \\ i'_{pqp} \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & \omega & 0 & 0 & \frac{-R'_p \omega_B}{k'_p} S_{dp} \\ -\omega & \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & 0 & 0 & \frac{-R'_p \omega_B}{k'_p} S_{qp} \\ 0 & 0 & \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & \omega & \frac{-R'_p \omega_B}{k'_p} S_{dn} \\ 0 & 0 & -\omega & \frac{-R'_p \omega_B}{L'_p} & \frac{-R'_p \omega_B}{k'_p} S_{qn} \\ \frac{3k_p \omega_B C'}{2} S_{dp} & \frac{3k_p \omega_B C'}{2} S_{qp} & \frac{3k_p \omega_B C'}{2} S_{dn} & \frac{3k_p \omega_B C'}{2} S_{qn} & \frac{-C' \omega_B}{R'_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i'_{pdp} \\ i'_{pqp} \\ i'_{pdn} \\ i'_{pqp} \\ v_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\omega_B}{L'_p} v'_{idp} \\ \frac{\omega_B}{L'_p} v'_{iqp} \\ \frac{\omega_B}{L'_p} v'_{idn} \\ \frac{\omega_B}{L'_p} v'_{iqn} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

A modelagem matemática do STATCOM para condições não balanceadas inclui a parte de sequência positiva, a parte de sequência negativa e o circuito comum CC. Eixos direto (d) de sequência positiva e correntes de eixos de quadratura (q) são acoplados com o termo ω . O mesmo ocorre para a sequência negativa.

Parte III

Simulações e Resultados

5 Simulação e Resultados

A partir da modelagem matemática abordada nos capítulos anteriores é possível simular o sistema elétrico de potência e analisá-lo antes, durante e após uma grande perturbação o afetar. Portanto é preciso modelar o sistema elétrico com seus componentes a fim de fazer a simulação computacional.

As simulações foram feitas no software *MATLAB*, onde as equações diferenciais foram solucionadas gerando gráficos para serem analisados.

O sistema a ser simulado é o de gerador síncrono conectado a um barramento infinito através de uma linha de transmissão, inicialmente sem a existência do STATCOM. Posteriormente inclui-se o STATCOM no sistema.

5.1 Análise do Sistema Máquina Conectada a um Barramento Infinito

O sistema proposto é formado por um gerador síncrono conectado a um barramento infinito por meio de duas linhas de transmissão de acordo com a figura (8).

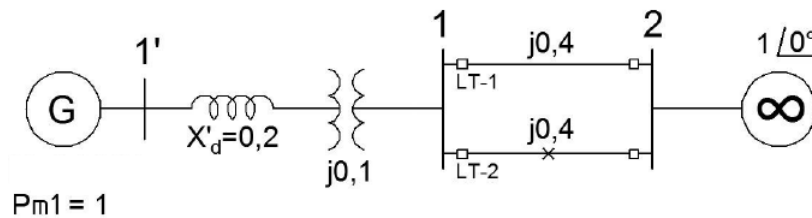


Figura 21 – Diagrama unifilar de máquina síncrona conectada em um barramento infinito através de duas linhas de transmissão (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Os parâmetros da máquina síncrona utilizados para a simulação do sistema em funcionamento, quando ocorre uma falta no tempo ($t = 1segundo$), foram:

- As resistências foram desprezadas;
- Potência mecânica = 1,0 pu;
- Reatância do transformador: $x_{tr} = 0,1$ pu;
- Reatância transitória: $x'_d = 0,2$ pu;
- Constante de inércia: $H = 5$ s;

- Constante de amortecimento: $D = 0,05 \frac{Ns}{m}$;
- Reatância das linhas de transmissão: $X'_{LT_1} = X'_{LT_2} = 0,4 \text{ pu}$;
- Tensão do barramento infinito: $E_{inf} = 1 \text{ pu}$.
- Ângulo do barramento infinito: $\delta_2 = 0^\circ$

5.1.1 Análise Pré-falta

Como já mencionado, um barramento infinito mantém constantes a sua tensão e frequência, consequentemente a velocidade angular e o seu ângulo não se alteram.

Considera-se que as potências mecânicas na entrada da máquina são constantes e com valor igual ao existente antes da falta.

Segundo (STEVENSON, 1974) a potência ativa transferida entre duas barras conectadas por uma reatância pode ser calculada por:

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (5.1)$$

Em que P_{12} é a potência transferida da barra 1 para a barra 2, E_1 e E_2 são respectivamente os valores das tensões nas barras 1 e 2, X_{12} é o valor da reatância entre as barras e δ_1 .

O fluxo de potência total é de $1pu$, o sistema é considerado sem perdas e $\delta_2 = 0$ pois o barramento é a referência. Assim é possível encontrar o ângulo da tensão da barra 1:

$$\delta_1 = \arcsin \frac{P_{12} X_{12}}{E_1 E_2} = 11,54^\circ \quad (5.2)$$

A corrente do circuito pode ser calculada por:

$$I_1 = \frac{E_1 - E_2}{jX_{12}} = 1,0 \angle 11,54^\circ - 1,0 \angle 0^\circ = 1,005 \angle 5,77^\circ pu \quad (5.3)$$

A reatância total X_{total} é dada por:

$$X_{total} = X'_d + X_{tr} + (X'_{LT_1} \parallel X'_{LT_2}) = 0,5 pu \quad (5.4)$$

A tensão interna do gerador é então calculada por:

$$E_g = E_1 + I_1(X_{total}) = 1,0 \angle 0^\circ + j0,5 \cdot (1,005 \angle 5,77^\circ) = 1,073 \angle 27,8^\circ pu \quad (5.5)$$

Convertendo o ângulo de fase de graus para radianos temos $E_g = 1,073\angle 0,4847$ pu.

Assim é possível calcular a potência ativa que o gerador fornece no período de pré-falta pela equação (5.6).

$$P_e^{prf} = \frac{1,073 \cdot 1}{0,5} = 2,146 \sin \delta_g \quad (5.6)$$

A equação de oscilação do sistema pré-falta é dada por:

$$\dot{\omega} = \frac{P_m - P_e^{prf}}{M} \quad (5.7)$$

Segundo (BRETAS; ALBERTO, 2000), o valor de M pode ser calculado por:

$$M = \frac{H}{\pi f} = \frac{5}{\pi 60} = 0,0265 \quad \frac{pu.s^s}{rad} \quad (5.8)$$

A equação diferencial que modela o sistema antes da falta é:

$$\dot{\omega} = \frac{1 - 2,146 \sin \delta_g}{0,0265} \quad (5.9)$$

A equação (5.9) apresenta dois valores que zeram a equação diferencial ($\omega = 0$), ou seja mantém o sistema em equilíbrio, são eles:

$$\begin{cases} \delta_g^{s-pré} = 27,8^\circ = 0,48 \text{radianos} \\ \delta_g^{u-pré} = 180^\circ - 27,8^\circ = 152,2^\circ = 2,66 \text{radianos} \end{cases} \quad (5.10)$$

5.1.2 Análise durante a falta

Seguindo a mesma lógica utilizada na seção 5.1.1 determina-se a equação diferencial que modela esta situação.

O circuito equivalente durante a falta é mostrado na figura 22.

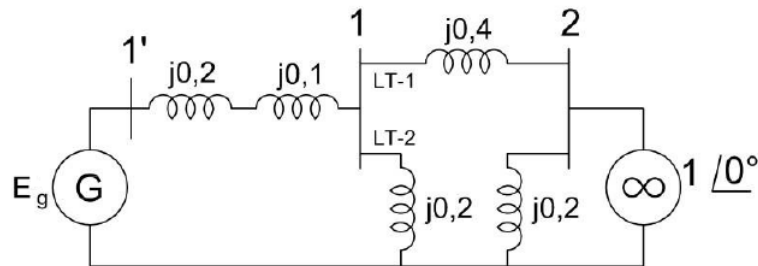


Figura 22 – Diagrama para o sistema em falta (BRETAS; ALBERTO, 2000).

É possível eliminar a barra 1 fazendo uma transformação estrela-triângulo nas barras 1-2 e ao o nó comum do gerador com a barra 2.

O circuito equivalente após eliminar a barra 1 é mostrado na figura (5.1.2).

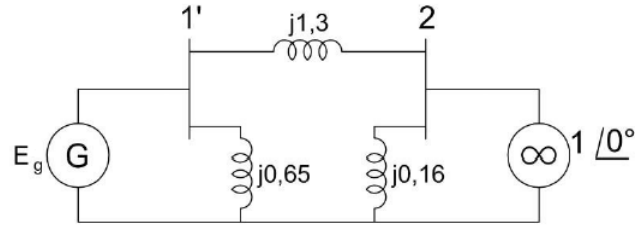


Figura 23 – Diagrama reduzido para o sistema em falta (BRETAS; ALBERTO, 2000).

Com isso a potência ativa do gerador é:

$$P_e^f = \frac{1,073 \cdot 1,0}{1,3} \sin \delta_g = 0,825 \sin \delta_g \quad (5.11)$$

A equação diferencial de oscilação para o sistema em falta é:

$$\dot{\omega} = \frac{1 - 0,825 \sin \delta_g}{0,0265} \quad (5.12)$$

Analisando a equação (5.12) verifica-se que não existe valores em que $\omega = 0$, pois os valores para que isso ocorresse nesta modelagem são maiores do que um.

5.1.3 Análise pós-falta

O circuito da figura (11) representa o sistema pós-falta.

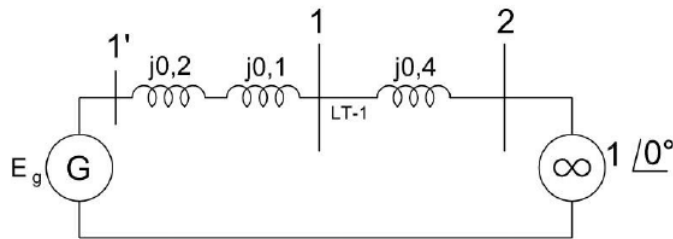


Figura 24 – Diagrama para o sistema pós-falta (BRETAS; ALBERTO, 2000).

A potência ativa do gerador é:

$$P_e^{pf} = \frac{1,073 \cdot 1,0}{0,7} \sin \delta_g = 1,533 \sin \delta_g \quad (5.13)$$

A equação diferencial de oscilação para o sistema em pós-falta é:

$$\dot{\omega} = \frac{1 - 1,533 \sin \delta_g}{0,0265} \quad (5.14)$$

Pela equação (5.14) é possível observar que existem dois pontos de equilíbrio ($\omega = 0$) para o sistema, quando:

$$\begin{cases} \delta_g^{s-pós} = 40,7^\circ = 0,71 \text{radianos} \\ \delta_g^{u-pré} = 180^\circ - 40,7^\circ = 139,3^\circ = 2,43 \text{radianos} \end{cases} \quad (5.15)$$

5.2 Simulação do sistema com tempo de abertura $t_a=0,32$ s após a falta

Para este caso a falta ocorre em $t = 1$ segundo e a eliminação da falta ocorre 32 segundos após o seu início ($t_a = 0,32$ segundos).

Pela figura 25 é visível que antes da falta o sistema está em equilíbrio. No momento da falta o ângulo do rotor da máquina começa a aumentar e diminuir, oscilando até o ponto de eliminação da falta, onde este ângulo começa a convergir para um novo ponto de equilíbrio.

A figura 26 ilustra o desvio de velocidade angular, que tem um comportamento semelhante ao ângulo do rotor, antes da falta existe o equilíbrio e este desvio é nulo, no início da falta a velocidade começa a oscilar e ao eliminar a falta o desvio de velocidade começa a convergir para zero até que se torne nulo novamente.

Esta dinâmica caracteriza que o sistema continua estável, pois após ocorrer a falta este sistema foi capaz de encontrar um novo ponto de funcionamento estável.

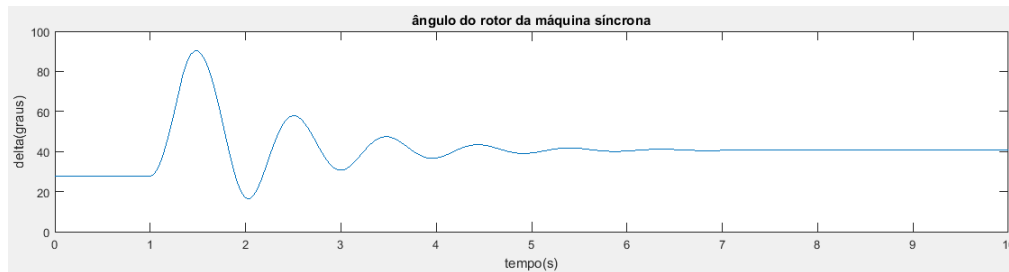


Figura 25 – Gráfico da variação do ângulo da máquina em relação ao tempo sem compensação para $t_a = 0,32$ segundos após a falta.

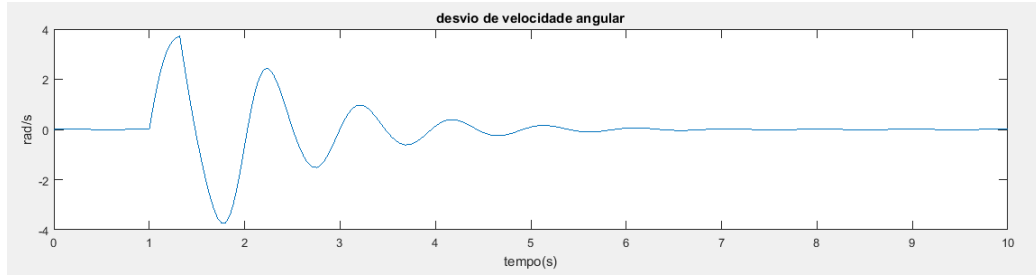


Figura 26 – Gráfico da variação da velocidade da máquina em relação ao tempo sem compensação para $t_a = 0,32$ segundos após a falta.

5.3 Simulação do sistema com tempo de abertura $t_a=0,486$ s após a falta

A fim de encontrar o tempo máximo que o sistema deve levar para abrir o circuito e manter a estabilidade. Alterando o tempo de abertura para 0,486 segundos, os resultados são ilustrados nas figuras 27 e 28.

Para encontrar o tempo máximo em que o sistema seria capaz de manter a estabilidade, rotinas no software MATLAB foram feitas mudando o tempo de abertura t_a e analisando o gráfico até que fosse identificada a perda de estabilidade.

O tempo crítico de abertura encontrado foi $t_{ca} = 0,485$ segundos, após esse tempo o sistema se torna instável.

Tomando $t_a = 0,486$ segundos, o comportamento do ângulo do rotor é constante antes da falta, porém no momento da falta ele começa a aumentar e após a falta a sua tendência é de continuar esse aumento. Isto caracteriza a instabilidade.

O desvio de velocidade para este caso aumenta no momento da falta até certo ponto e começa a oscilar em $20 \frac{rad}{s}$. O desvio de velocidade não volta a ser nulo caracterizando instabilidade.

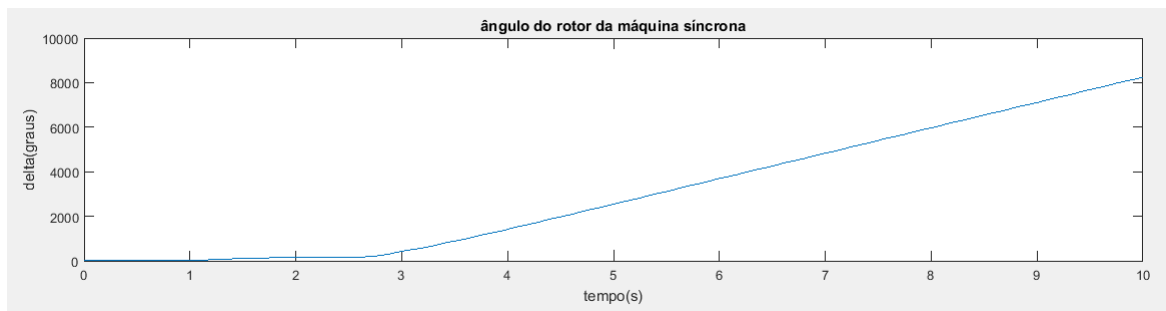


Figura 27 – Gráfico da variação do ângulo da máquina em relação ao tempo sem compensação para $t_{ca} = 0,486$ segundos após a falta.

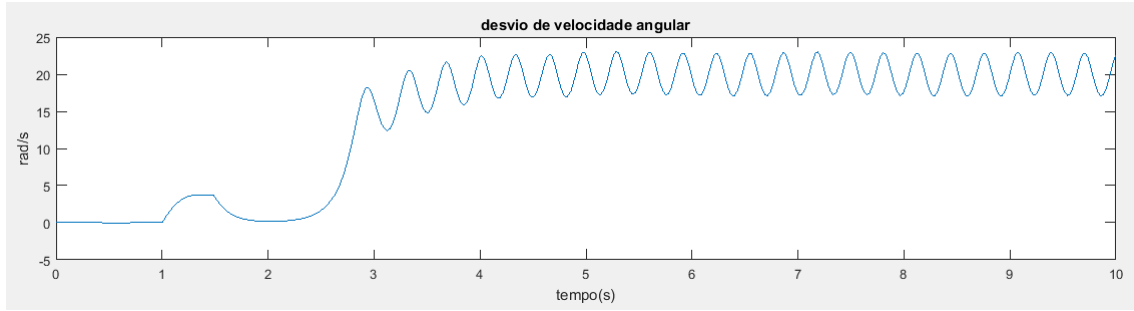


Figura 28 – Gráfico da variação da velocidade da máquina em relação ao tempo para $t_{ca} = 0,486$ segundos após a falta.

5.4 Sistema de duas máquinas síncronas

Com a finalidade de estudar a estabilidade transitória de sistemas de potência, será utilizado o sistema demonstrado na figura 29. Neste tipo de sistema cada um dos barramentos da rede é analisado, afim de averiguar o comportamento da estabilidade do sistema em relação à influência que a carga e os geradores conectados aos barramentos provocam.

O sistema estudado consiste de duas máquinas síncronas, que simulam uma geração hidráulica, conectadas por linhas de transmissão, que atendem uma carga, dois transformadores e três barramentos. A máquina 1 (M_1) se encontra distante da carga e a máquina 2 (M_2) simula uma geração local para esta carga. As linhas de transmissão que conectam estas duas máquinas tem 350 km de extensão e transmitem uma potência de 950 MW. As duas máquinas são compostas por turbinas hidráulicas, sistema de excitação e estabilizador de sistemas de potência (PSS).

Nesta simulação uma falta será aplicada na linha de transmissão e o comportamento do sistema será observado.

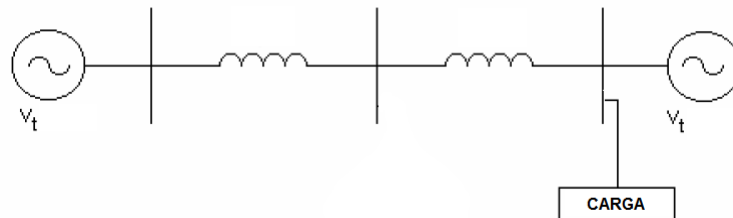


Figura 29 – Diagrama unifilar do sistema.

A máquina 1 tem potência de 1000 MVA, a máquina 2 tem 5000 MVA, que geram em 13,85 kV e os transformadores elevam esta tensão para 500 kV, que é a tensão das linhas de transmissão. A carga atendida é de 5000 MW.

Os parâmetros dos geradores no sistema por unidade são:

- Reatâncias: $X_d = 1.305p.u.$; $X_q = 0.474p.u.$; $X_l = 0.18p.u.$
- Reatâncias transitórias: $X'_d = 0.296p.u.$; $X'_q = 0,3p.u.$
- Reatâncias subtransitórias: $X''_d = 0.252p.u.$; $X''_q = 0.243p.u.$
- $R_a = 0,0028p.u.$
- Constante de inércia das máquinas 1: $H_1 = 3,7s$
- Constante de inércia das máquinas 2: $H_3 = s$
- Constantes de tempo: $T'_d = 1.01s$; $T''_d = 0.053s$; $T''_q = 0.1s$
- Constante de amortecimento: $K_D = 0$

Para os transformadores, com potência de base de 1000 MVA e 5000 MVA, tensão de base de 500 kV, a sua impedância será $Z_t = 0 + j0,12p.u.$. Os parâmetros das linhas de transmissão, comprimento de 350 km cada, e tensão de base de 500 kV, serão:

- Resistência: $r = 0,0001 \frac{p.u}{km}$
- Reatâncias: $x = 0,001 \frac{p.u}{km}$
- Susceptância: $b_C = 0,00175 \frac{p.u}{km}$

A carga deste sistema se localiza na barra 3 e tem as seguintes características:

- L_1 : $P_L = 5000MW$, $f_L = 60Hz$

Os geradores deste sistema possuem sistemas de excitação, que regulam o desempenho destas máquinas síncronas em busca do melhor ponto de funcionamento, para que aumente a confiabilidade do sistema. Os componentes desse sistema de excitação são o regulador de tensão, regulador de velocidade e o estabilizado de sistema de potência (PSS).

As simulações relativas a este sistema foram feitas no *Matlab*, no ambiente do *SimPowerSystem* que consta no *Simulink*, onde é possível utilizar diagramas de blocos que representam componentes dos sistemas elétricos de potência para simular o sistema estudado.

5.4.1 Falta trifásica no sistema sem o STATCOM

O sistema a ser simulado, tem como objetivo analisar a sua estabilidade quando ocorre uma falta na linha de transmissão entre a máquina 1 e a máquina 2, próxima à máquina 1. O desempenho dos geradores do sistema são verificados pelos seus ângulos e desvios de velocidade. São analisados nos barramentos as tensões terminais e o fluxo de potência entre eles.

O diagrama trifilar do sistema de duas máquinas de Kundur é mostrado na figura 30.

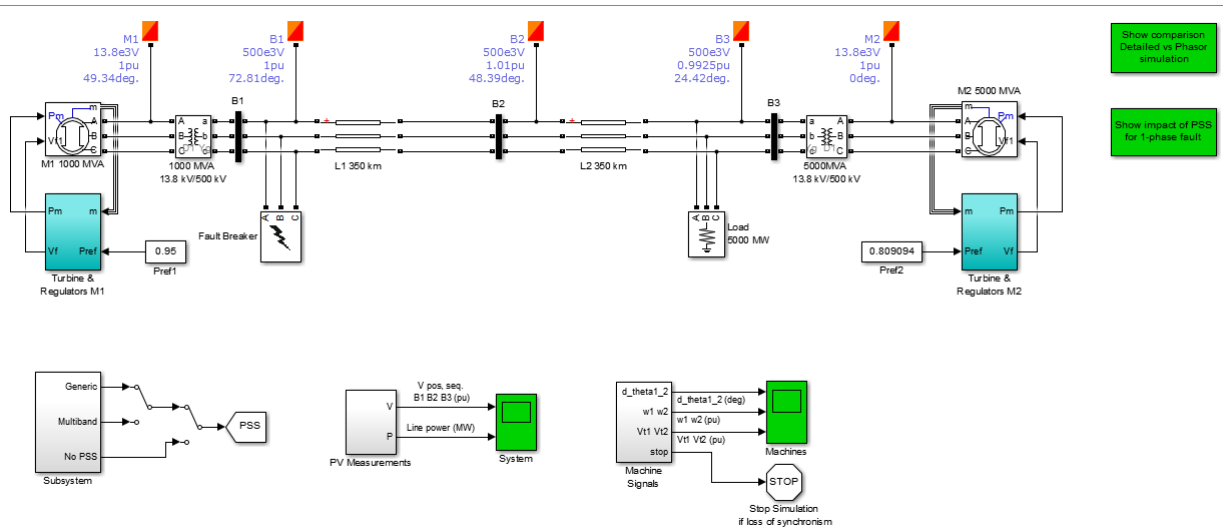


Figura 30 – Diagrama trifilar do sistema sem STATCOM

O sistema trifilar mostra as duas máquinas interligadas por duas linhas de transmissão e três barramentos além dos blocos de medição das variáveis de interesse.

O sistema de excitação e controle das turbinas (máquinas síncronas), é ilustrado na figura 31.

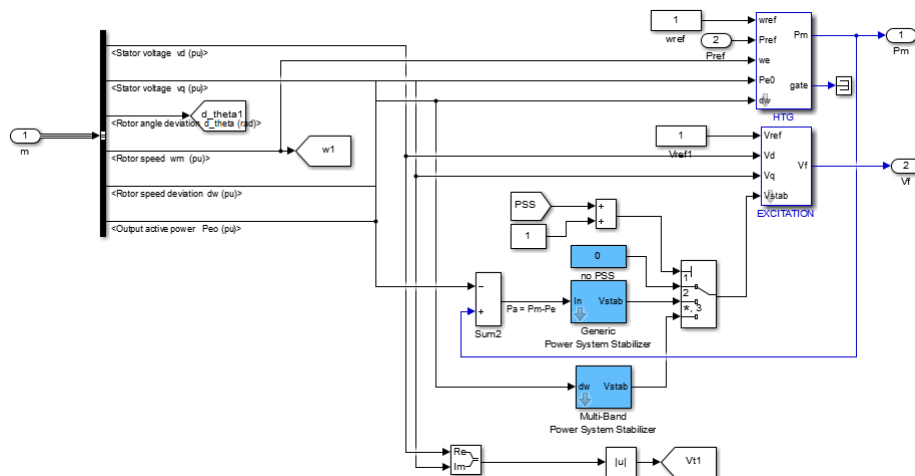


Figura 31 – Diagrama de blocos dos componentes das turbinas

A simulação deste sistema se dá com um tempo de pré falta de 1 segundo, com a duração da falta sendo de 0,1 segundos e com tempo total de duração da simulação de 15 segundos. A partir da simulação se observam os ângulos das máquinas, seus desvios de velocidade e as tensões terminais. Também são observadas as tensões nos barramentos e a potência da linha de transmissão.

A figura 32 ilustra o ângulo da máquina 1 utilizando a máquina 2 como referência. É notável neste gráfico, que após a falta, o ângulo da máquina 1 começa a se comportar de forma diferente comparado ao instante pré falta, e seu ângulo começa a aumentar rapidamente até perder a estabilidade, que é o instante em que a simulação termina. O tempo até a perda de estabilidade do sistema foi de 2,195 segundos.

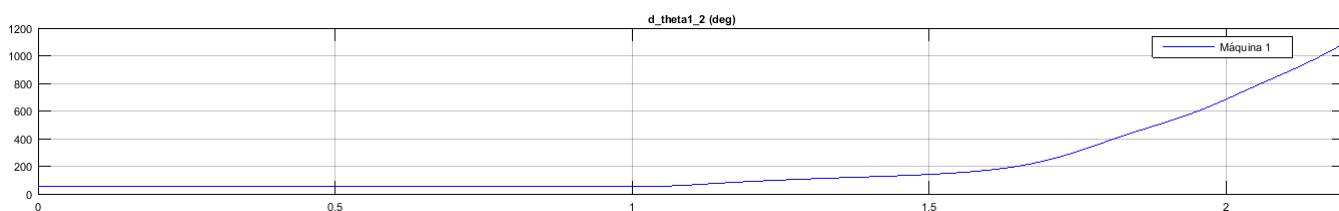


Figura 32 – Gráfico do ângulo da máquina 1 em relação à máquina 2 sem STATCOM

O gráfico da figura 33 ilustra a variação dos desvios de velocidade das máquinas do sistema. É notável que os desvios de velocidade são bem distintos. A máquina 2, que fica próxima à carga, apresenta uma variação pequena em relação à máquina 1, diminuindo este desvio até que o sincronismo seja perdido e a simulação pare. Já a máquina 1, no momento em que ocorre a falta já começa a aumentar o seu desvio e este comportamento continua até que o sincronismo seja perdido com tempo de 2,195 segundos.

O gráfico da figura 34 mostra o comportamento das tensões terminais das máquinas síncronas deste sistema. A máquina 1, que está distante da carga e próxima à

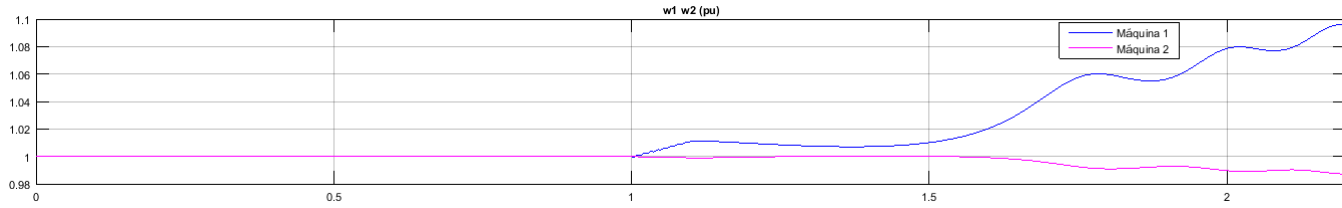


Figura 33 – Gráfico dos desvios de velocidade das máquinas 1 e 2 sem STATCOM

falta, apresenta variação em sua tensão terminal no momento da falta, tendo uma queda. Quando a falta é eliminada, a sua tensão terminal começa a aumentar e fica oscilando até que a estabilidade seja perdida. A máquina 2 apresenta uma leve queda de tensão no momento da falta, e após a falta também apresenta oscilação de tensão até perder o sincronismo.

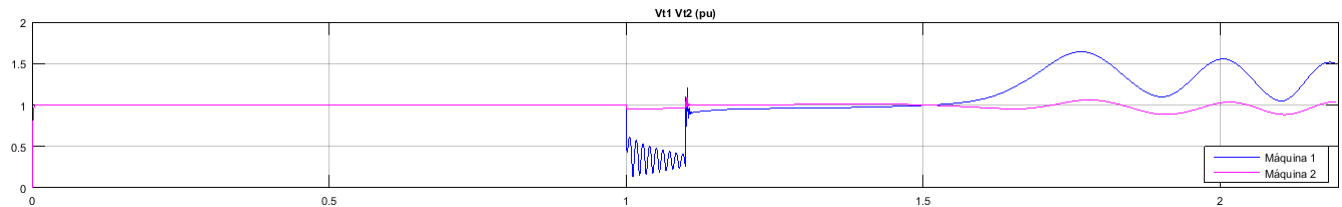


Figura 34 – Gráfico das tensões terminais das máquinas 1 e 2 sem STATCOM

O comportamento dos barramentos do sistema, assim como o comportamento da potência da linha de transmissão, quando ocorre uma falta no sistema sem o STATCOM conectado, também foram observados e podem ser vistos nas figuras 35 e 36.

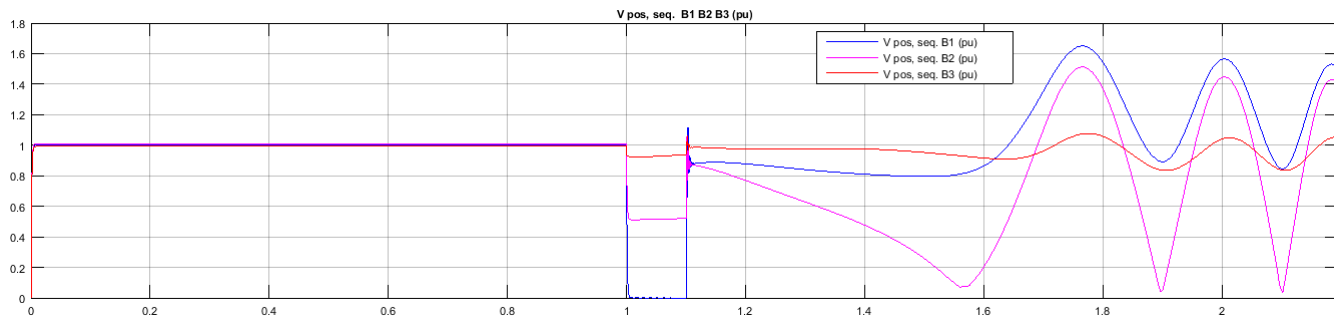


Figura 35 – Gráfico das tensões nos barramentos do sistema sem STATCOM

É possível observar que as tensões dos barramentos e a potência na linha de transmissão tem comportamento semelhante no momento da falta, como se esperava, pois o efeito da variação da tensão nos barramentos se reflete diretamente na potência transmitida.

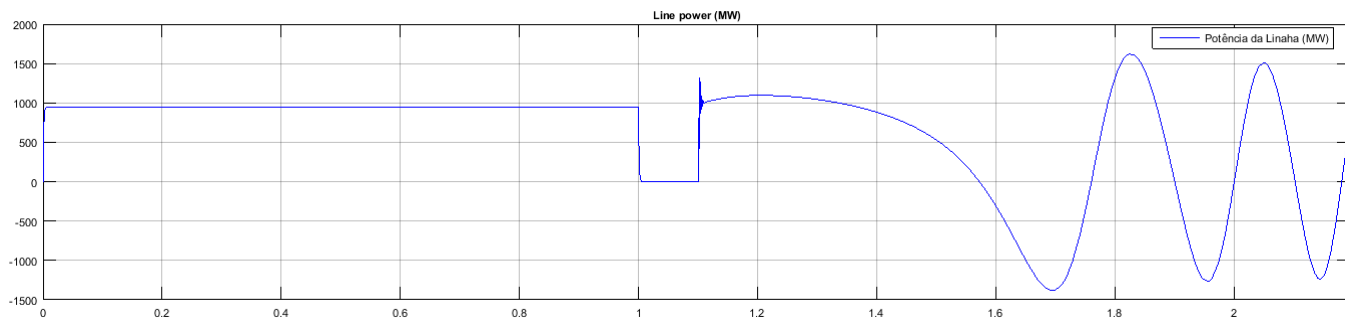


Figura 36 – Gráfico da potência nas linhas de transmissão do sistema, sem STATCOM

No gráfico das tensões dos barramentos observa-se que no momento da falta a tensão no barramento 1 cai para zero, no barramento 2 a tensão diminui para cerca de metade do seu valor nominal, enquanto a tensão no barramento 3 tem uma pequena diminuição. Este comportamento se mantém durante a falta. Já no período pós falta as tensões dos três barramentos crescem rapidamente, porém, logo começam a oscilar bruscamente.

Neste período, a tensão da barra 1 tem uma leve queda até aproximadamente 1,5 segundos, e após esse período começa a oscilar até divergir e finalizar a simulação. A tensão na barra 2 apresentou uma grande diminuição de tensão após a falta e em seguida também começou a oscilar com valores mínimos próximos de zero e máximos acima de $1,6pu$. Seguindo a tendência, a barra 3 também oscilou até divergir, porém muito menos do que as outras barras e manteve sua oscilação com magnitude menor do que as outras duas barras. O tempo de simulação, até o sistema divergir, foi de 2,1949 segundos.

A potência na linha de transmissão teve queda até zero no momento da falta, permaneceu com este valor durante a falta e no momento logo após a eliminação da falta oscilou próxima de seu valor base. Após este curto período teve uma grande queda e começou a oscilar até perder a estabilidade juntamente com a tensão das barras.

O comportamento do sistema analisado sem conexão do STATCOM, mesmo com a utilização do estabilizador de sistemas de potência (PSS) nas máquinas, foi observado e para a falta com duração de 0,1 segundo a estabilidade do sistema foi perdida. Portanto, apenas o sistema de excitação das máquinas não é capaz de manter a estabilidade nestas condições.

5.4.2 Falta trifásica no sistema com STATCOM

Após observar que o sistema não consegue manter a estabilidade para as condições de falta estabelecidas, optou-se por conectar um STATCOM em paralelo com a linha de transmissão no barramento 2 como mostrado na figura 37.

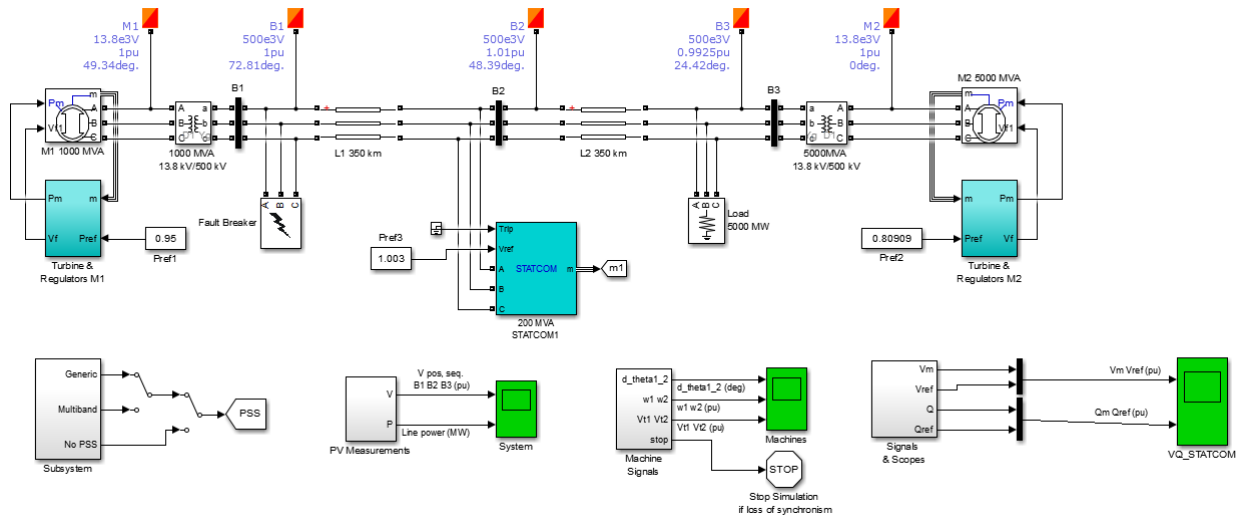


Figura 37 – Diagrama trifilar do sistema com STATCOM

Com a conexão do STATCOM espera-se que o sistema mantenha a estabilidade, se reestabelecendo após um tempo.

O novo gráfico do ângulo da máquina 1, ilustrado na figura 38, demonstra o seu comportamento após conectar o STATCOM na barra 2 do sistema. Observa-se que no momento da falta o ângulo da máquina começa a aumentar e tem uma oscilação que atinge valores máximos acima de 100 graus e mínimos abaixo de 20 graus. Porém, passados três segundo do período pós falta o sistema começa a voltar para o estado de estabilidade e portanto, não perde o seu sincronismo. Após oito segundo é possível ver que este ângulo já não varia mais e permanece com seu valor base.

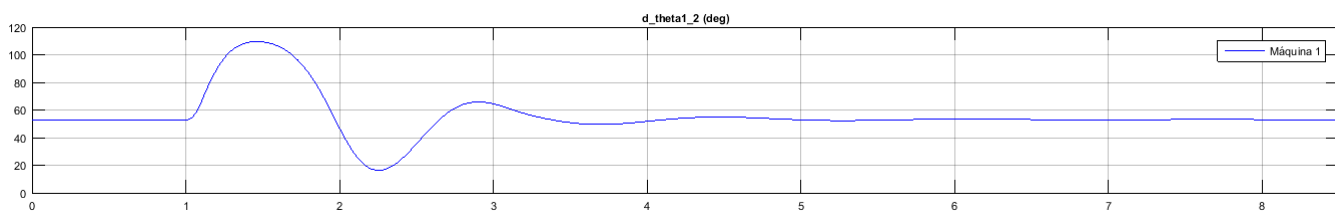


Figura 38 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, com STATCOM

O desvio de velocidade das máquinas também sofreu mudanças se comparado ao sistema sem STATCOM. No gráfico da figura 39 observa-se este comportamento.

A máquina 1 teve um aumento acentuado em seu desvio de velocidade no momento da falta e posteriormente começa a oscilar, apresentando valores máximo acima de 1,01 e mínimos abaixo de 0,995. No entanto, passados quatro segundo da eliminação da falta

o sistema conseguiu manter a estabilidade com novo ponto de funcionamento um pouco acima do seu valor base de 1 pu.

A máquina 2 apresentou uma leve variação em seu desvio de velocidade e juntamente com a máquina 1 manteve sua estabilidade no mesmo ponto de operação.

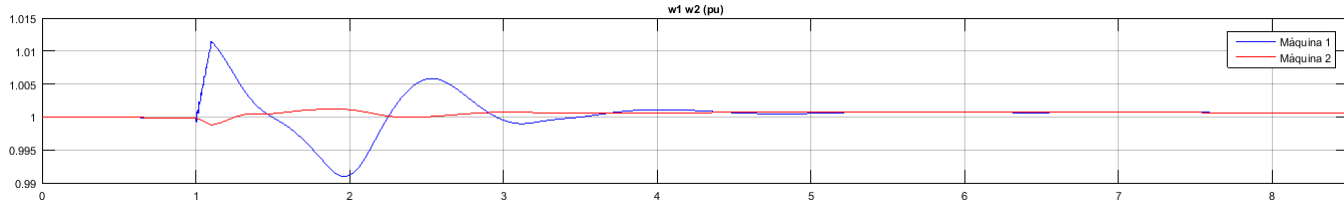


Figura 39 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas 1 e 2, com STATCOM

As tensões terminais das máquinas são ilustradas no gráfico da figura 40.

Na máquina 1 observa-se um profundo afundamento de tensão com muita oscilação no momento em que ocorre a falta, que dura até o término da falta. No período pós falta a tensão ainda varia um pouco próxima do valor base e passados três segundos da eliminação da falta, o sistema se equilibra novamente.

A máquina 2 tem uma pequena queda de tensão durante a falta e no período pós falta apresenta uma leve oscilação, contudo apenas um segundo após a falta já se encontra em equilíbrio novamente.

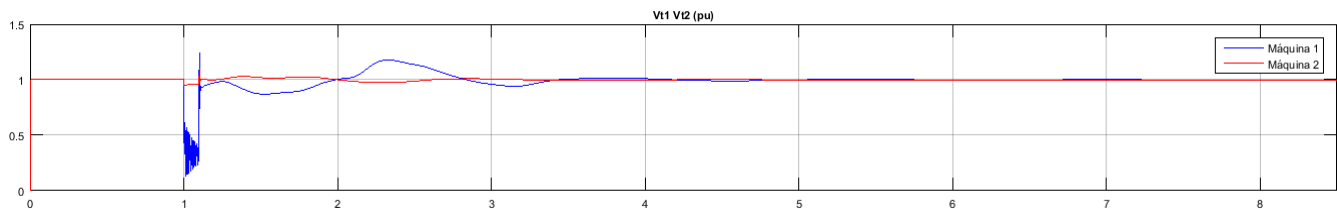


Figura 40 – Gráfico das tensões terminais das máquinas 1 e 2, com STATCOM

O comportamento das tensões nos barramentos do sistema funcionando com STATCOM conectado ao barramento 2 é ilustrado na figura 41 e o perfil de potência na linha de transmissão na figura 42.

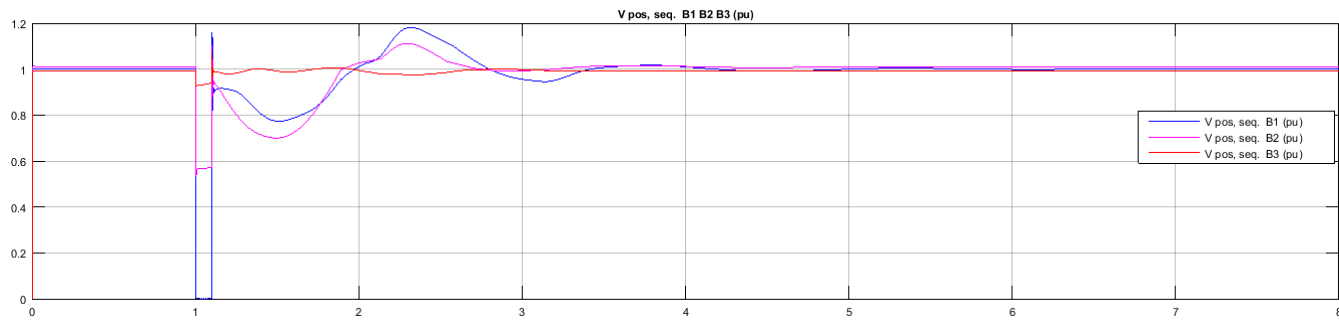


Figura 41 – Gráfico das tensões nos barramentos do sistema, com STATCOM

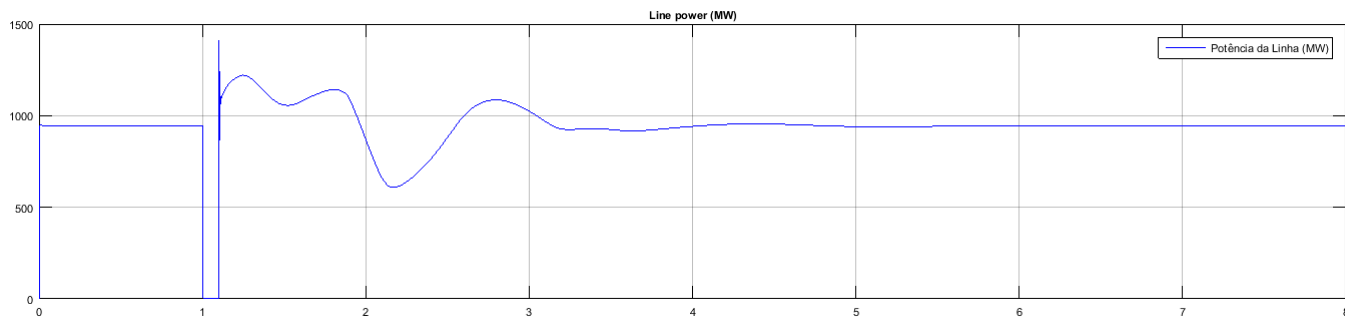


Figura 42 – Gráfico da potência na linha de transmissão do sistema, com STATCOM

No momento da falta na barra 1 do sistema ocorre uma queda de tensão até zero, permanecendo assim durante a falta. Após a eliminação desta falta, a tensão aumenta para próximo do valor base e começa a oscilar com valores máximos próximo de 1,2 pu e mínimos abaixo de 0,8 pu. Passados quatro segundos o sistema retorna ao equilíbrio.

A barra 2 apresenta comportamento semelhante à barra 1, porém, a sua queda de tensão durante a falta é bem menor e volta a se manter em equilíbrio após passados três segundos.

A barra 3 é menos sensível à falta, tem uma pequena queda de tensão durante a falta e passados dois segundos da eliminação desta falta já se encontra em equilíbrio novamente.

A potência elétrica da linha seguiu mantendo um comportamento parecido com as tensões dos barramentos. Durante a falta atinge valor igual a zero e no período pós falta retorna para valores próximos do seu valor base, porém no sistema com STATCOM, oscila até três segundos após a falta e depois se mantém estável.

5.4.3 Falta Monofásica sem STATCOM

O sistema foi simulado com uma falta monofásica e o comportamento do circuito, nos mesmo parâmetros da falta trifásica, foram observados.

Os gráficos das figuras 43, 44 e 45 mostram os comportamentos do ângulo da máquina 1 em relação à máquina 2, o desvio de velocidade dessas máquinas e as suas tensões terminais, respectivamente.

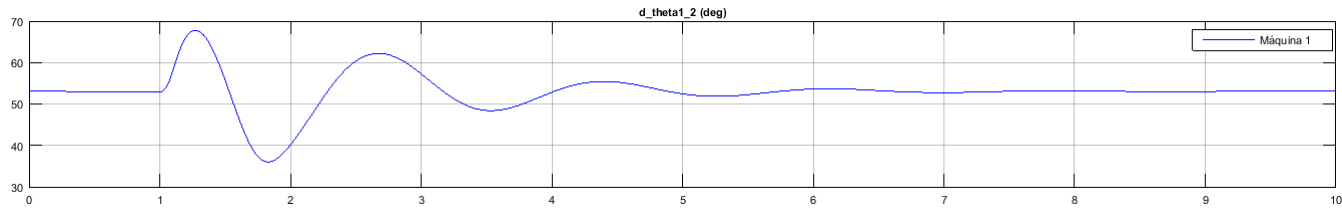


Figura 43 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, sem STATCOM

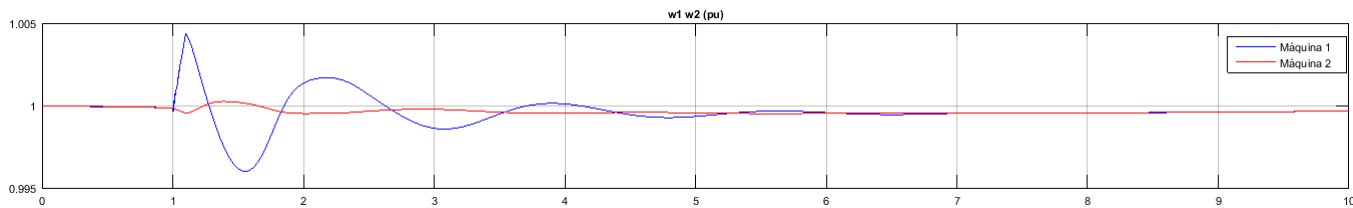


Figura 44 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas, sem STATCOM

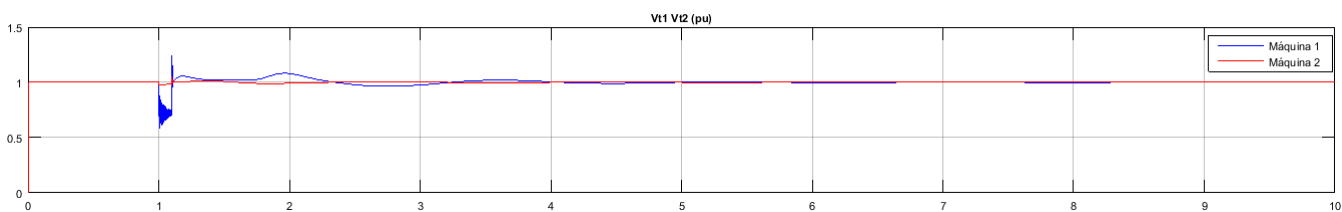


Figura 45 – Gráfico das tensões terminais das máquinas, sem STATCOM

Como é possível observar nos gráficos acima, em uma falta trifásica ou monofásica a máquina 1 sofre algumas oscilações em seu ângulo, desvio de velocidade e tensão terminal, contudo consegue manter a estabilidade cinco segundos após a falta, sem a necessidade do STATCOM conectado.

A máquina 2 por sua vez, sofre pouca variação durante a falta e também consegue manter sua estabilidade após a eliminação da falta.

As tensões nos barramentos e a potência na linha de transmissão do sistema também foram avaliados como ilustrado nas figuras 46 e 47.

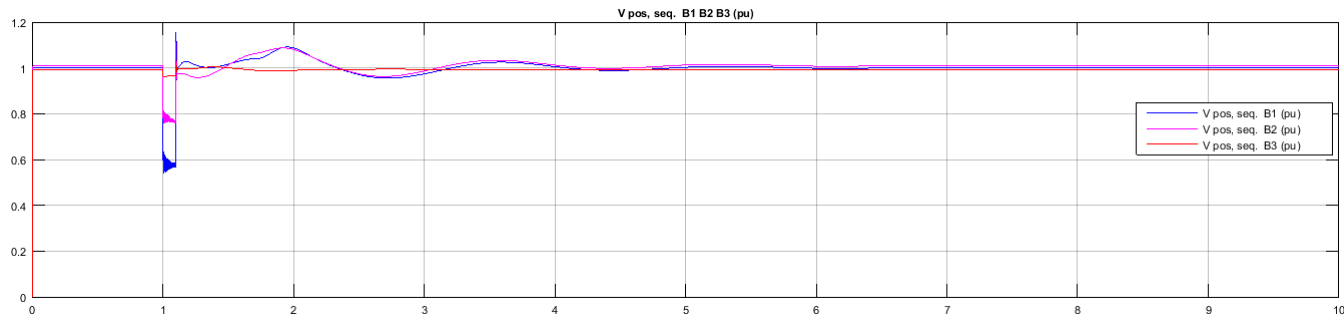


Figura 46 – Gráfico das tensões nos barramentos do sistema, sem STATCOM

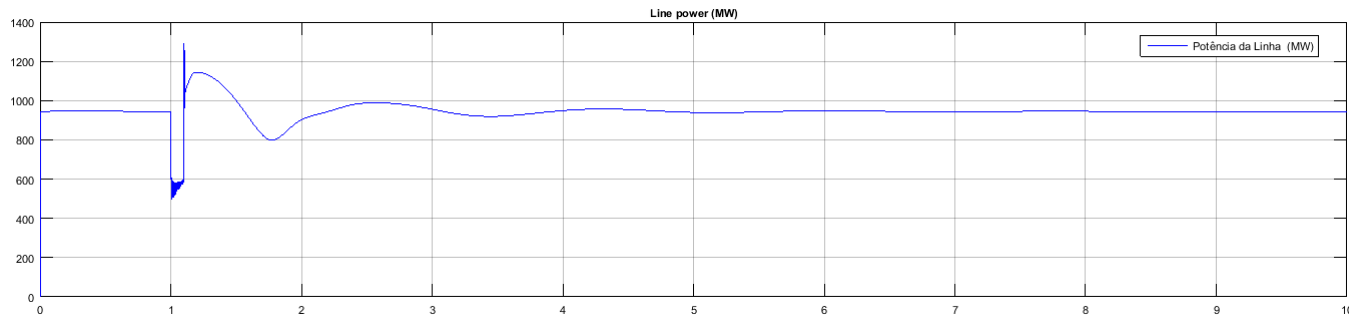


Figura 47 – Gráfico da potência das linhas de transmissão do sistema, sem STATCOM

A tensão na barra 1 apresenta uma queda no momento da falta, porém diferentemente da falta trifásica, esta queda não chega a zerar a tensão, caindo para próximo de 0,6 pu. A tensão na barra 2 segue o mesmo comportamento, porém, com uma queda menor decrescendo até próximo de 0,8 pu. Por consequência, a tensão na barra 3 também apresenta uma queda, no entanto, muito menor do que das barras 1 e 2. Passados 4 segundos após a eliminação da falta o sistema reestabelece o equilíbrio.

A potência na linha de transmissão segue o mesmo comportamento das tensões das barras, e seguindo o mesmo exemplo das barras, seu valor não zera para a falta monofásica e após 4 segundos da eliminação da falta, também reestabelece o equilíbrio.

5.4.4 Falta monofásica com STATCOM

Ao conectar o STATCOM neste sistema e simular uma falta monofásica, observa-se que os parâmetros analisados são semelhantes ao sistema sem o STATCOM. Portanto não se observa grandes mudanças para estas condições.

As figuras 48, 49, 50, 51 e 52 ilustram os comportamentos do ângulo da máquina 1, desvio de velocidade, tensão terminal das máquinas 1 e 2 e tensão nos barramentos do sistema, com STATCOM, possibilitando visualizar que são praticamente iguais ao comportamento do sistema sem STATCOM para uma falta monofásica.

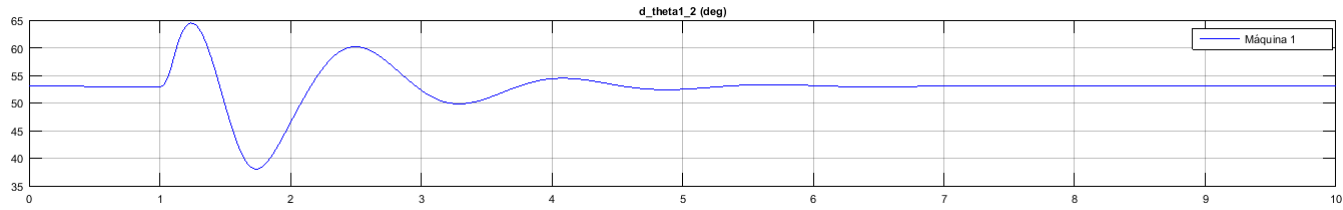


Figura 48 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, com STATCOM

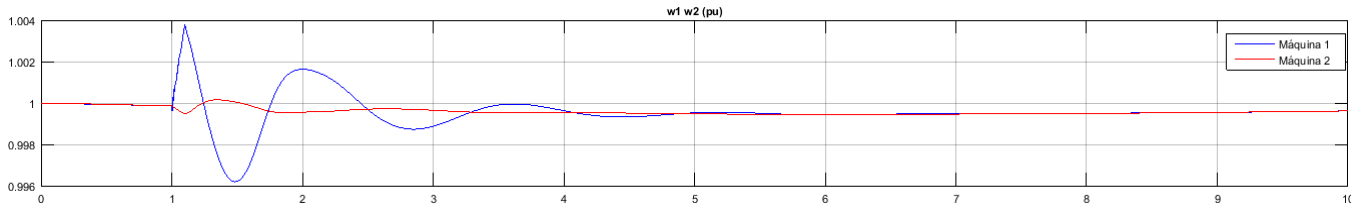


Figura 49 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas 1 e 2, com STATCOM

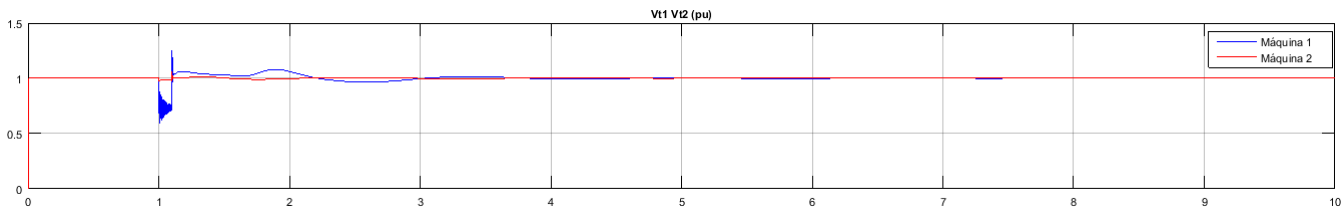


Figura 50 – Gráfico da tensão terminal das máquinas 1 e 2, com STATCOM

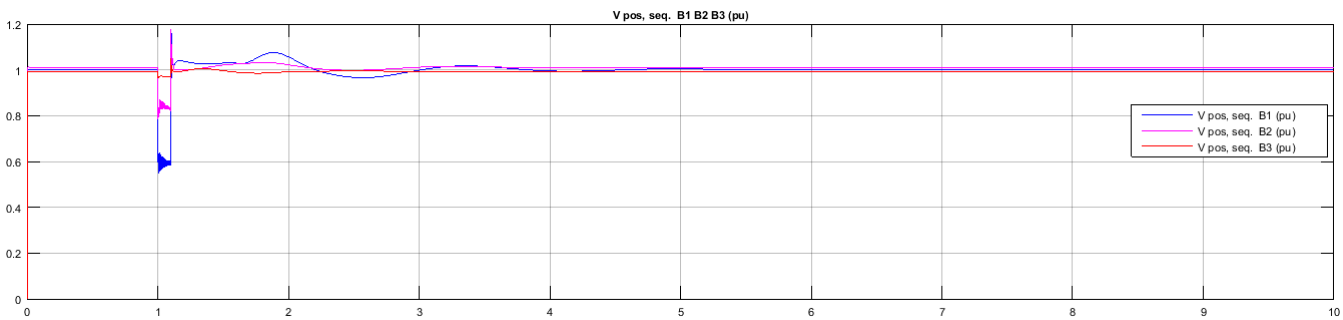


Figura 51 – Gráfico da tensão nos barramentos do sistema, com STATCOM

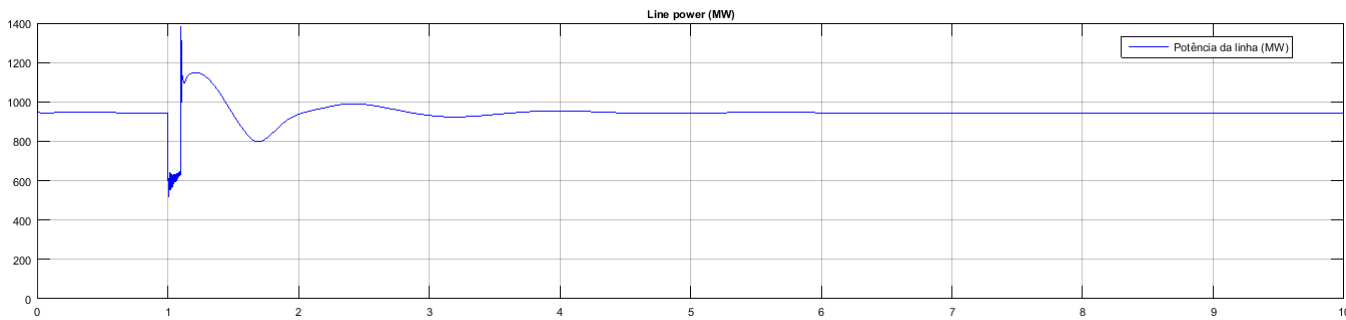


Figura 52 – Gráfico da potência na linha de transmissão do sistema, com STATCOM

5.4.5 Falta trifásica com STATCOM conectado no fim da linha de transmissão

A fim de determinar o melhor lugar para se conectar o equipamento STATCOM, foi simulado sua conexão no fim da linha de transmissão, no barramento 3, mais distante do local onde ocorreu a falta.

Com isso os mesmos parâmetros analisados anteriormente nas outras simulações serão levados em conta. A figura 53 ilustra o local onde o STATCOM foi conectado no sistema simulado.

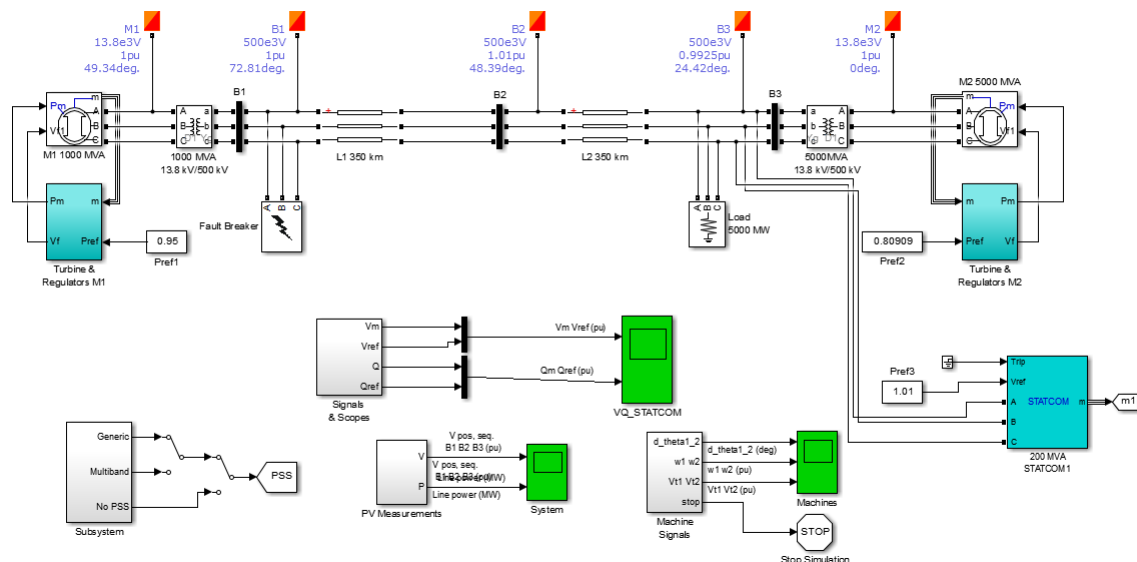


Figura 53 – Diagrama trifilar do sistema com STATCOM conectado no fim de linha

O gráfico do ângulo da máquina 1, figura 54, ilustra o comportamento da máquina 1 utilizando a máquina 2 como referência, quando o STATCOM está conectado no fim de linha. É possível observar que o ângulo diverge, e a simulação termina no instante de tempo igual a 2,1657 segundos. Portanto, mesmo com o STATCOM instalado neste local, ele não é capaz de manter a estabilidade do sistema quando ocorre esta falta.

Observa-se neste gráfico que após a eliminação da falta, o ângulo começa a aumentar de maneira pouco acentuada, porém passados 1,6 segundos o ângulo começa a divergir bastante, fazendo com que o sistema perca o sincronismo.

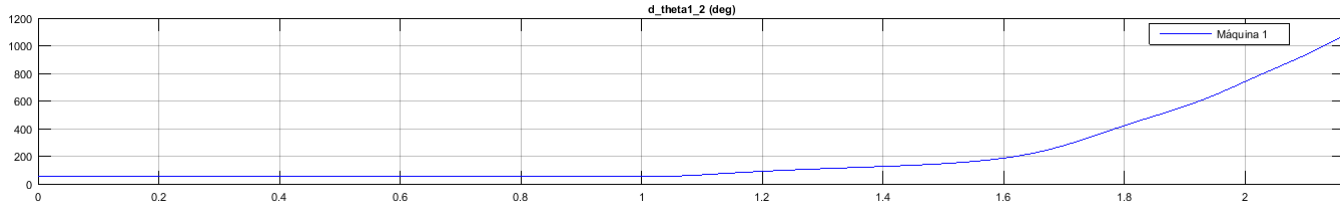


Figura 54 – Gráfico do ângulo da máquina 1 com a máquina 2 como referência, com STATCOM no fim de linha

O desvio de velocidade das duas máquinas é mostrado na figura 55. Durante a falta a máquina 1 apresenta um aumento em seu desvio de velocidade, assim como no período pós falta, e no instante de tempo igual a 1,6 segundos, assim como o seu ângulo, seu desvio de velocidade diverge bastante até perder o sincronismo.

A máquina 2 apresenta uma leve queda de tensão após a eliminação da falta e com o passar do tempo continua caindo até perder o sincronismo e parar a simulação.

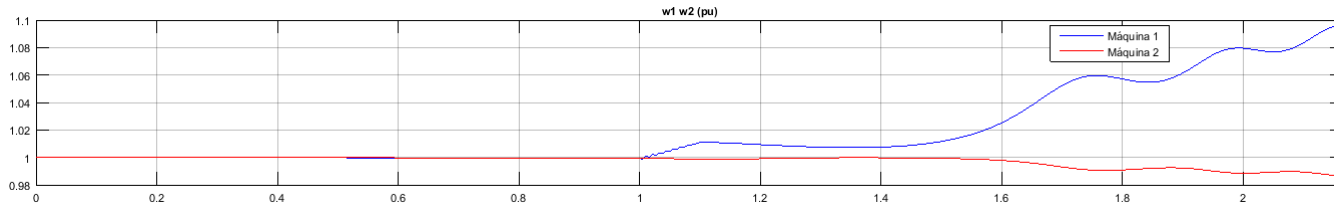


Figura 55 – Gráfico do desvio de velocidade das máquinas 1 e 2, com STATCOM no fim de linha

A tensão terminal das máquinas são ilustradas no gráfico da figura 56. É possível observar que no momento da falta a tensão terminal da máquina 1 tem uma grande queda e oscila bastante durante a falta. Após a falta esta tensão aumenta para próximo da tensão base e sem mantém assim até o instante de tempo igual a 1,53 segundos, quando começa a aumentar e oscilar até que o sincronismo é perdido e a simulação para.

A máquina 2 apresenta uma variação bem pequena em sua tensão terminal, com uma leve queda no momento e durante a falta. Após a eliminação da falta sua tensão sobe para o seu valor base e ao passar 1,53 segundos começa a oscilar próximo de seu valor base, até que o sincronismo é perdido.

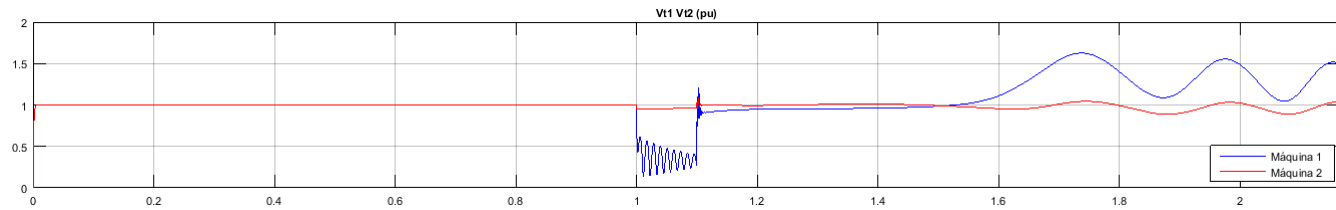


Figura 56 – Gráfico das tensões terminais das máquinas 1 e 2, com STATCOM no fim de linha.

As tensões nos barramentos e a potência da linha de transmissão são ilustrados nas figuras 57 e 58.

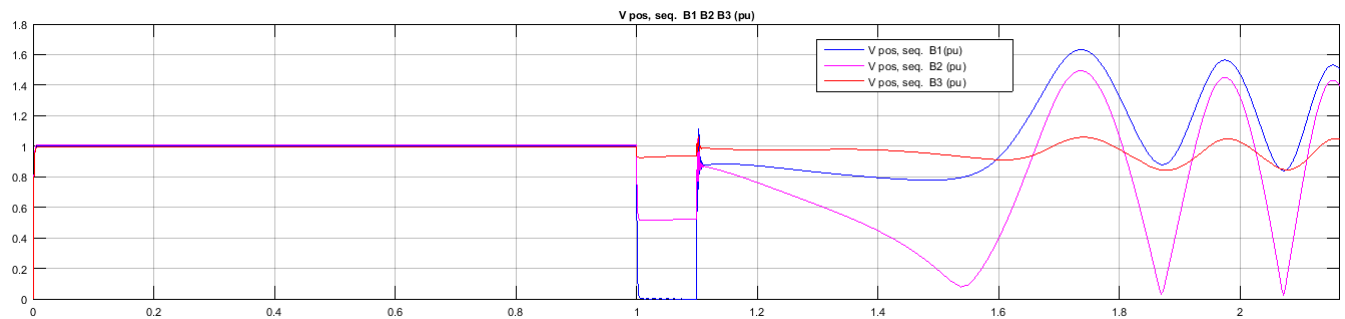


Figura 57 – Gráfico da tensão nos barramentos do sistema, com STATCOM no fim de linha.

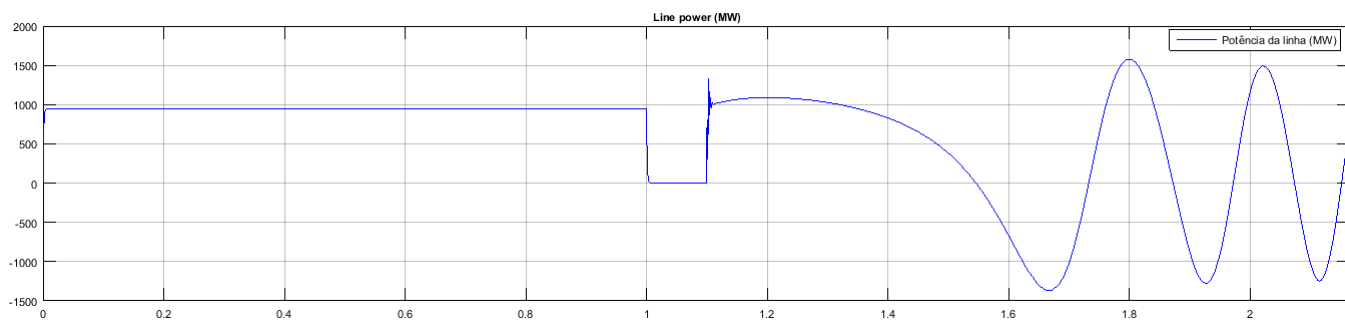


Figura 58 – Gráfico da potência da linha de transmissão do sistema, com STATCOM no fim de linha

Assim como no cenário em que o sistema não tinha o STATCOM instalado, o sincronismo foi perdido e de forma bastante semelhante.

A tensão da barra 1 cai para zero no momento da falta e se mantém assim até que a falta seja eliminada. Após a eliminação da falta a tensão passa a oscilar até perder o sincronismo. A barra 2 também apresenta uma queda de tensão no momento e durante

a falta, porém, não chega a zerar a tensão e no período pós falta começa a oscilar bastante. A tensão na barra 3 sofre menos influência da falta, no entanto, segue o comportamento das barras 1 e 2 mas em menor escala.

A potência na linha de transmissão atinge o valor zero no momento e durante a falta. Após a falta ocorre uma grande queda em relação a seu valor base e depois uma grande oscilação até a perda de sincronismo, acarretando na finalização da simulação.

5.4.6 Análise dos tempos críticos de abertura

A tabela (1) demonstra os tempos críticos observados nas simulações feitas.

Tipo de falta	Tempo crítico de abertura (s)	
	Sem STATCOM	Com STATCOM
Falta trifásica	0,088	0,106
Falta monofásica	0,235	0,319
Falta trifásica com com STATCOM no fim da LT	0,088	0,086

Tabela 1 – Tabela de tempos críticos de abertura

Ao aplicar uma falta trifásica no sistema, observou-se ou aumento do t_{ca} aumenta ao conectar o STATCOM no meio da linha de transmissão (barra 2), gerando um aumento da margem de estabilidade do sistema para este caso.

No entanto, ao conectar o STATCOM no final da linha de transmissão (barra 3), foi observado uma diminuição do tempo crítico em relação ao sistema sem o STATCOM.

Ao aplicar uma falta monofásica no circuito e com o STATCOM conectado no meio da linha de transmissão, observou-se que o t_{ca} também aumentou, garantindo assim uma maior margem de estabilidade para o sistema.

6 Conclusão

Após ser feito o levantamento teórico acerca do tema abordado neste trabalho, foram feitas simulações para avaliar o comportamento do sistema elétrico proposto sem a utilização do STATCOM e com a sua utilização.

As simulações do sistema máquina conectada a um barramento infinito através de linhas de transmissão, permitiram encontrar o tempo crítico de abertura para o sistema $t_{ca} = 0,485$ segundos após a falta.

Ao simular o sistema de duas máquinas síncronas proposto, pôde-se observar que o STATCOM garantiu o aumento da margem de estabilidade do sistema diante das condições simuladas. Para uma falta trifásica sem o STATCOM, o sistema perde sincronismo e com a sua instalação, na barra 2, o sincronismo é retomado e o tempo crítico de abertura aumenta.

Ao simular uma falta trifásica sem o STATCOM conectado, o sistema perdia totalmente o seu sincronismo, o ângulo das máquinas divergiam, seus desvios de velocidade e tensões terminais também.

Para a falta monofásica observou-se que com STATCOM conectado ou não, o resultado é muito parecido. Na condição simulada, o sistema consegue reestabelecer o sincronismo sem a necessidade do STATCOM. No entanto, o tempo crítico de abertura do sistema aumenta.

Para o cenário em que o STATCOM foi conectado no fim da linha de transmissão e foi aplicado uma falta trifásica, o sistema perdeu o sincronismo. Adicionalmente esta instalação causou uma diminuição no tempo crítico de abertura do sistema. Os parâmetros do equipamento estavam configurados para conexão na barra 2 e não foram alterados antes de sua conexão na barra 3, o que indica que estes parâmetros devem ser modelados de acordo com o seu local de instalação para que o funcionamento esperado seja observado.

Portanto, conclui-se que o STATCOM consegue aumentar a margem de estabilidade transitória do sistema caso esteja configurado com os parâmetros adequados para o seu local de instalação.

Referências

- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1980. v. 1. Citado na página 26.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 23.
- BLAZIC, B.; PAPIC. Improved d-statcom control for operation with unbalanced currents and voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 21, n. 1, p. 225–233, 2006. Citado na página 49.
- BOMFIM, A. L. B. do. *Ajuste coordenado de estabilizadores de sistema de potência usando algoritmos genéticos*. [S.l.]: RJ: COPPE, 2000. Citado na página 31.
- BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. *Estabilidade transitória em sistema eletroenergéticos*. [S.l.]: EESC/USP, 2000. Citado 12 vezes nas páginas 6, 7, 28, 30, 31, 32, 33, 35, 37, 52, 54 e 55.
- CHUN, L. et al. Rule-based control for statcom to increase power system stability. In: IEEE. *Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON'98. 1998 International Conference on*. [S.l.], 1998. v. 1, p. 372–376. Citado na página 46.
- DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 316–327, 1969. Citado na página 21.
- EPE. Nota técnica: “projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos”. *Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro*, 2015. Citado na página 16.
- GYUGYI, L. Dynamic compensation of ac transmission lines by solid-state synchronous voltage sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 9, n. 2, p. 904–911, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 6, 40 e 42.
- HINGORANI, N. G. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2000. v. 1. Citado 6 vezes nas páginas 6, 38, 43, 44, 45 e 46.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1993. v. 7. Citado 7 vezes nas páginas 6, 16, 22, 23, 28, 31 e 35.
- LARSEN, E. V. et al. Benefits of gto-based compensation systems for electric utility applications. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 7, n. 4, p. 2056–2064, 1992. Citado na página 39.
- LEMOES, J. R. F. Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transitórios eletromecânicos. *Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro*, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MILLER, T. J. E. *Reactive Power Control in Electric Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 41.

ONS. *Resultados da operação: qualidade do suprimento*. 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/pt/paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento>>.

Citado na página 17.

REPORT, I. T. F. Definition and classification of power system stability ieeecigre joint task force on stability terms and definitions. *IEEE transactions on Power Systems*, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, 2004. Nenhuma citação no texto.

SANTOS, C. H. R. R. *Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: Universidade Federal de Itajubá, 2003. Citado 5 vezes nas páginas 6, 39, 40, 41 e 43.

SHAHNIA, F. *Static compensators (STATCOMs) in power systems*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 6, 47, 48, 49 e 50.

SIQUEIRA, D. S. *Controle não Linear Aplicado a Dispositivos FACTS em Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 6, 16, 24 e 27.

STEVENSON, W. D. *Elementos de análise de sistemas de potência*. [S.l.]: McGraw-Hill do Brasil, 1974. Citado 3 vezes nas páginas 25, 32 e 53.

YU, Y. Statcom modeling and analysis in damping power system oscillations. In: IEEE. *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000.(IECEC) 35th Intersociety*. [S.l.], 2000. v. 2, p. 756–762. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.